



António Ricardo Padeiro Tavares

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

Modelação e Validação de um Sistema de ar para mistura de polímeros

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: António Alegria da Cunha, Mestre, GEO-
Ground Engineering Operations

Co-orientador: Luis Gil, Professor Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Arguente(s): Mestre António Alegria da Cunha

Prof. Doutor José Paulo Barbosa Mota



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2017



António Ricardo Padeiro Tavares

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

Modelação e Validação de um Sistema de ar para mistura de polímeros

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: António Alegria da Cunha, Mestre, GEO-
Ground Engineering Operations

Co-orientador: Luis Gil, Professor Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Arguente(s): Mestre António Alegria da Cunha

Prof. Doutor José Paulo Barbosa Mota



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2017

Identificação de variáveis que afetam uma mistura que passa de fluido newtoniano para fluido não newtoniano

Copyright © António Ricardo Padeiro Tavares, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos, reproduzida em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Para realização desta dissertação contei com ajuda e disponibilidade de várias pessoas, às quais quero deixar os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, António Cunha, pelas suas sugestões e disponibilidade para me ajudar em todas as fases desta dissertação. Agradeço também ao meu coorientador, o Professor Luis Gil.

Deixo o meu agradecimento à empresa que proporcionou os meios para desenvolver este trabalho, a GEO - Ground Engineering Operations e também ao seu director, Jorge Capitão-Mor. Devo agradecer a todos os membros da equipa da GEO com quem trabalhei, em particular à Telma Barroso. Não posso deixar de agradecer o apoio das minhas colegas que fizeram as suas dissertações na GEO, a Catarina Rodrigues, a Daniela Pequito e a Sara Leonardo.

ABSTRACT

The work developed in this thesis consists on the parameterization of a Pulsair system to work in a rectangular tank, using mathematical modeling and experimental validation. The system must be able to mix a solution with ratio of 1 g of PolyGEO to 1 L of tap water, in order to obtain a fluid with 90 s/quart Marsh funnel viscosity and a standard deviation of the flow time smaller than 0,3 mL/s, in 4 samples from different regions of the tank.

The case studies are divided in computational and experimental. In a first instance multiphase and turbulence models, amongst those available in ANSYS Fluent, were chosen and validated. The multiphase model used was *Volume of Fluid* and the turbulence models were *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable* e *k-omega standard*. The models were validated by comparing the rising velocity of a bubble, measured experimentally, with velocity measured in CFD analysis. The experimental work consisted in testing different parameters in a rectangular tank with 84x41x34 cm dimensions. Three different accumulator plate diameters were tested, 40 mm, 80 mm and 120 mm, four different plate arrangements were also tested, along with four different methods of dispersing the polymer. Finally the parameters that offered the best results, the ones that practically reached the goals of this thesis, were scaled-up, to use in a rectangular tank with 195x95x78 cm dimensions, and two different Line Vac sizes were tested along with two different TOn's, TOn=0,1 s and TOn=0,3 s.

The CFD analysis used to validate the turbulence model resulted in the selection of the k-epsilon standard model, with an error between the experimental and computational velocities of 4.3%. The best results obtained in 30 minutes the 84x41x34 cm tank were a 78.75 s/quart viscosity and a 0.27 mL/s standard deviation. The best results in the 195x95x78 cm tank were a 74.5 s/quart viscosity and a 0.29 mL/s standard deviation.

Key words: Pulsair system; polymer solution; mixing; dispersion; hydration; CFD analysis; air bubbles.

RESUMO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação consiste na parametrização de um sistema Pulsair num recipiente de geometria retangular, através de modelação matemática e validação experimental. O sistema deve misturar uma solução de 1 g de PolyGEO para 1 L de água da torneira, para obter um fluido com viscosidade em cone de Marsh de 90 s/quart e com um desvio padrão do tempo de escoamento em cone de Marsh menor que 0,3 mL/s, para 4 amostras de pontos diferentes do tanque.

Os casos de estudo dividem-se em computacionais e experimentais. Numa primeira fase foram escolhidos e validados modelos multifase e de turbulência disponíveis no software *ANSYS Fluent*, para realizar uma análise CFD do sistema Pulsair. O modelo multifase utilizado foi o *Volume of Fluid* e os modelos de turbulência testados foram o *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable* e *k-omega standard*. Os modelos foram validados comparando a velocidade de ascensão de uma bolha, medida experimentalmente e medida numa análise CFD desse caso. Na fase experimental realizaram-se testes num tanque retangular com dimensões 84x41x34 cm, foram testadas placas acumuladoras de 40 mm, 80 mm e 120 mm de diâmetro, foram testadas 4 disposições diferentes das placas e foram experimentados 4 modos de dispersão do polímero. Por fim, foi realizado um scale-up dos parâmetros que permitiram melhores resultados, que praticamente atingiram os objetivos da dissertação, para utilizá-los num tanque retangular com dimensões 195x95x78 cm, foram testados 2 Line Vac de diferentes dimensões e dois TOn, TOn=0,1 s e TOn=0,3 s.

A análise CFD realizada para validação do modelo de turbulência resultou na escolha do *k-epsilon standard*, com um erro entre a velocidade experimental e computacional de 4,3%. No tanque de 84x41x34 cm obteve-se uma solução com viscosidade 78,75 s/quart e desvio padrão de 0,27 mL/s. No tanque de 195x95x78 cm obteve-se uma solução de 74,5 s/quart e desvio padrão 0,29 mL/s.

Palavras-chave: sistema Pulsair; solução de polímero; mistura; dispersão; hidratação; análise CFD; bolhas de ar.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
ABSTRACT.....	VII
RESUMO.....	IX
ÍNDICE	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
SÍMBOLOS GREGOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 POLÍMEROS	1
1.1.1 <i>Polímeros de elevado peso molecular solúveis em água</i>	3
1.1.1.1 Propriedades reológicas de soluções poliméricas	5
1.1.1.2 Dissolução de polímeros solúveis em água	8
1.2 SISTEMAS DE MISTURA	10
1.2.1 <i>Agitação mecânica</i>	12
1.2.2 <i>Agitação com ar comprimido</i>	13
1.2.2.1 Sistema pulsair.....	15
1.3 ANÁLISE CFD	19
1.3.1 <i>Análise CFD de escoamentos com duas fases</i>	19
1.3.2 <i>Análise CFD de mistura de fluidos não-newtonianos</i>	21
1.3.3 <i>Análise CFD de mistura utilizando um sistema pulsair</i>	22
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
2.1 MATERIAIS.....	23
2.2 ESTRATÉGIA	23
2.3 MÉTODOS.....	23
2.3.1 <i>Análise CFD em 3D de bolhas de ar</i>	23
2.3.2 <i>Protocolos experimentais de mistura de solução de PolyGEO em tanque retangular de escala reduzida</i>	25
2.3.2.1 Disposição de placas A.....	25
2.3.2.2 Protocolo com a disposição de placas B.....	27
2.3.2.3 Protocolo com a disposição de placas C	27
2.3.3 <i>Protocolos experimentais de mistura da solução de PolyGEO no tanque retangular</i>	29
2.3.4 <i>Medição da viscosidade</i>	30
2.3.5 <i>Avaliação da homogeneidade da solução</i>	30
2.3.6 <i>Determinação das constantes que caracterizam o comportamento reológico da solução de PolyGEO</i>	31
3. DISCUSSÃO.....	32
3.1 ANÁLISE CFD EM 3D DE BOLHAS DE AR.....	32
3.2 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE ASCENSÃO DE UMA BOLHA DE AR	36
3.2.1 <i>Medição experimental da velocidade de uma bolha de ar</i>	36
3.2.2 <i>Medição computacional da velocidade de uma bolha de ar</i>	37
3.2.3 <i>Comparação de resultados experimentais e computacionais</i>	38
3.3 PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS DE MISTURA DE SOLUÇÃO DE POLYGEO EM TANQUE RETANGULAR DE ESCALA REDUZIDA.....	39
3.3.1 <i>Disposição de placas A</i>	39

3.3.1.1	Comparação de diâmetro das placas.....	39
3.3.1.2	Otimização da pressão do sistema e do modo de dispersão do PolyGEO	40
3.3.2	<i>Disposição de placas B</i>	42
3.3.3	<i>Disposição de placas C</i>	43
3.3.3.1	Ensaio com a disposição de placas C1	43
3.3.3.2	Ensaio com a disposição de placas C2	44
3.4	PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE MISTURA DE SOLUÇÃO DE POLYGEO EM TANQUE RETANGULAR, UTILIZANDO A DISPOSIÇÃO DE PLACA C2	48
3.4.1	<i>Comparação com os resultados dos testes em escala reduzida e estudo do efeito do tempo de mistura</i>	48
3.4.2	<i>Otimização do modo de dispersão do polímero</i>	49
3.4.3	<i>Estudo do efeito do Ton</i>	51
3.4.4	<i>Estudo do efeito do modo de alimentação das placas acumuladoras</i>	51
4.	CONCLUSÃO	53
5.	BIBLIOGRAFIA	55
6.	ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Representação esquemática dos diferentes tipos de estruturas de polímeros: a). Linear b) Ramificada c) Reticulada (adaptado de [16]).....	2
Figura 1.2: Representação esquemática tipos de copolímeros: a) Alternado b). Aleatório c) Bloco d) Graftizado ou enxertado (adaptado de [17])	3
Figura 1.3: Comportamento dos fluidos independentes do tempo com deformação angular [52]	5
Figura 1.4: Comportamento dos fluidos dependentes do tempo com deformação angular [52] ..	6
Figura 1.5: a) Funil de Marsh (adaptado de [68]) b) Dimensões do funil de Marsh de acordo com norma API RP 13B-1 (adaptado de [69])	8
Figura 1.6: Representação das várias fases da dissolução de um polímero (adaptado de [58]) a). Moléculas do polímero em estado sólido logo após adição ao solvente b). Moléculas do polímero hidratado c) Moléculas dissolvidas e dispersas no solvente	9
Figura 1.7: Exemplo de “olhos de peixe” numa solução de carboximetilcelulose (adaptado de [81])	10
Figura 1.8: Edutor para materiais em pó (adaptado de [93])	11
Figura 1.9: Sistema de dispersão descrito na patente de Larwick mostrando o contentor de polímero (4), a câmara de vórtice (10), o edutor (14 e 20), a bomba centrífuga e o tanque de mistura (30) (adaptado de [72])	12
Figura 1.10: Tipos de impulsores. a) Impulsor helicoidal (adaptado de [104]) b) Impulsor de âncora (adaptado de [98]) c) Impulsor axial (turbina) (adaptado de [105]) d) Impulsor radial (turbina Rushton) (adaptado de [106])	13
Figura 1.11: a) Desenho do sistema da patente nº 3,159,383, mostrando a entrada de ar no contentor (7) e as correntes geradas pelo jato de ar (adaptado de [108]). b) Desenho do sistema da patente nº 3,179,379, mostrando as entradas de ar, o cone e o vórtice de ar (adaptado de [109])	14
Figura 1.12: Desenho do sistema pulsair patenteado em 1986, mostrando a entrada de ar no tanque (25), a placa acumuladora (42), a bolha formada (46) e a corrente gerada (48;50;52;54) (adaptado de [115])	15
Figura 1.13: a) Placa acumuladora do sistema pulsair (adaptado de [120]) b) Escoamento criado no fluido pelo sistema pulsair (adaptado de [121])	16
Figura 1.14: Disposição das placas acumuladoras em sistemas pulsair a) Disposição das placas no sistema descrito na patente de Parks (adaptado de [115]) b) Disposição das placas no sistema patenteado por Koopmans (adaptado de [122])	16
Figura 1.15: Disposição de placas acumuladoras utilizada no teste de suspensão de sólidos (adaptado de [123])	18
Figura 1.16: a) Contornos de velocidade da fase líquida b) Vetores de velocidade da fase líquida (adaptado de [149])	21
Figura 1.17: Resultados obtidos utilizando o modelo de turbulência LES a) Fração de cada fase, a vermelho a fase líquida e azul a fase gasosa b) Campo de velocidades (adaptado de [121])	22
Figura 2.1: Domínio utilizado para a análise CFD de bolhas	24
Figura 2.2: Disposição das placas A	26
Figura 2.3: Disposição das placas B	27
Figura 2.4: Disposição das placas C	28
Figura 2.5: Disposição de 6 placas no tanque grande	30
Figura 3.1: Campos de velocidade dos testes 13 e 14, após 0,4s de escoamento a) Teste 13 b) Teste 14	33
Figura 3.2: Campo de velocidade do teste 48, após 0,4s de escoamento	33
Figura 3.3: Campos de velocidades dos testes 13 e 14, após 0,8s de escoamento a). Teste 13 b) Teste 14	34
Figura 3.4: Campo de velocidades do teste 48, após 0,8s de escoamento	34
Figura 3.5: Campos de velocidades dos testes 13 e 14, após 1,2s de escoamento a). Teste 13 b) Teste 14	35
Figura 3.6: Campo de velocidades do teste 48, após 1,2s de escoamento	35
Figura 3.7: Montagem utilizada para determinar a velocidade de ascensão de uma bolha	37

Figura 3.8: Domínio utilizado para simular uma bolha de ar em ascensão no mini-silo.....	38
Figura 3.9: Gráfico da variação da viscosidade e desvio padrão, para uma solução misturada com água da torneira, de acordo com a variação de Toff	46
Figura 3.10: Gráfico da variação da viscosidade e desvio padrão, para uma solução misturada com água destilada, de acordo com a variação de Toff	47
Figura 3.11: Acumulação de aglomerados de polímero no fundo tanque (assinalados pelo círculo).....	49
Figura 3.12: Comparação entre o Line Vac de diâmetro de 1" (à esquerda) e o Line Vac de diâmetro de 10 mm (à direita)	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Modelos de turbulência utilizados	24
Tabela 2.2: Ensaio de comparação de diâmetros de placas acumuladoras	26
Tabela 2.3: Ensaio de otimização da pressão do Pulsair e do modo de dispersão de PolyGEO	26
Tabela 2.4: Parâmetros dos ensaios utilizando a disposição B.....	27
Tabela 2.5: Parâmetros dos ensaios com a disposição C1	28
Tabela 2.6: Parâmetros dos ensaios com a disposição C2	29
Tabela 2.7: Parâmetros do sistema Pulsair e disposição das placas acumuladoras	30
Tabela 3.1: Teste para comparação dos modelos de turbulência	32
Tabela 3.2: Resultados da medição da velocidade de ascensão da bolha	38
Tabela 3.3: Testes para comparação do diâmetro das placas acumuladoras	39
Tabela 3.4: Resultados dos testes de otimização da dispersão do PolyGEO e da pressão do sistema Pulsair	41
Tabela 3.5: Resultados dos testes com a disposição de placas B	42
Tabela 3.6: Resultados dos testes com a disposição de placas C1	43
Tabela 3.7: Resultados dos testes com a disposição de placas C2	44
Tabela 3.8: Testes com disposição de placas C2 para estudo do efeito do Toff	45
Tabela 3.9: Testes no tanque retangular com parâmetros de scale-up, LV - Line Vac.....	48
Tabela 3.10: Resultados dos testes para a otimização da dispersão do polímero	50
Tabela 3.11: Resultados dos testes de comparação de TOn	51
Tabela 3.12: Testes de comparação do modo de alimentação das placas acumuladoras	52

LISTA DE ABREVIATURAS

- LV - Line Vac
- g - gramas
- s - segundo
- min - minutos
- s/quart – segundo por quarto de galão
- L - litros
- m - metros
- Pa - pascal
- N - newton
- CFD - Computational fluid Dynamics
- VOF - Volume of Fluid

LISTA DE SÍMBOLOS

- K - índice de consistência
- n - índice de comportamento de escoamento
- Re - Número de Reynolds
- N - Velocidade de rotação do impulsor
- D - Diâmetro do impulsor
- D_{placa} - Diâmetro da placa acumuladora
- D_{tubo} - Diâmetro interno do tubo de alimentação de ar
- Q - Caudal
- TOn - Tempo de injeção de ar
- TOff - Tempo entre pulso de ar

Símbolos gregos

- τ - Tensão de corte
- μ - Viscosidade
- γ - Taxa de deformação angular
- τ_0 - Tensão de cedência

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existem soluções de polímeros de elevado peso molecular que são utilizadas como fluidos de perfuração que permitem a estabilização de fundações [1]. Estes fluidos deverão ter elevada viscosidade, valores de pelo menos 35 a 60 s/quart, de forma a conseguirem sustentar as paredes dos furos.

O processo de mistura destas soluções poliméricas apresenta algumas dificuldades, como a formação de aglomerados, que impedem a dissolução de todo o polímero, comprometendo as propriedades do fluido [2].

Nesta dissertação será estudado, através de métodos numéricos e experimentais, o processo mistura da solução, de modo a otimizar este processo e pretende-se que o fluido obtido apresente uma viscosidade de 90 s/quart em menos de 30 minutos e que seja o mais homogêneo possível (em 4 amostras recolhidas de 500 mL, em profundidade, em pontos diferentes, o tempo de escoamento deve apresentar um desvio padrão no máximo de ≤ 0.3 mL/s em cone de Marsh).

1.1 Polímeros

Os polímeros classificam-se como macromoléculas e são constituídos por unidades químicas repetitivas, os monómeros. Estes monómeros são unidos por ligações covalentes formando cadeias longas. O número de monómeros de uma cadeia é definido como o grau de polimerização [3].

A polimerização pode ser definida como uma combinação entre várias moléculas, dando origem a uma molécula de elevado peso molecular. Trata-se da reação química que dá origem aos polímeros [4].

As propriedades dos polímeros, como a solubilidade, viscosidade ou o módulo de Young, são altamente dependentes da estrutura do polímero, particularmente do seu peso molecular e da quantidade de ligações cruzadas entre as unidades. Uma baixa solubilidade surge normalmente associada à presença de ligações cruzadas [5].

Os polímeros podem ser classificados quanto à sua origem, quanto à sua estrutura, quanto à sua composição ou quanto ao tipo de polimerização [6] [7].

Relativamente à origem os polímeros podem ser classificados como naturais, semi-sintéticos ou sintéticos. Os polímeros naturais são extraídos diretamente da natureza, como, por exemplo, o látex ou a celulose. Os polímeros semi-sintéticos são produzidos através da modificação de polímeros naturais. Os polímeros sintéticos são obtidos por ação humana, através de reações de polimerização [8] [9].

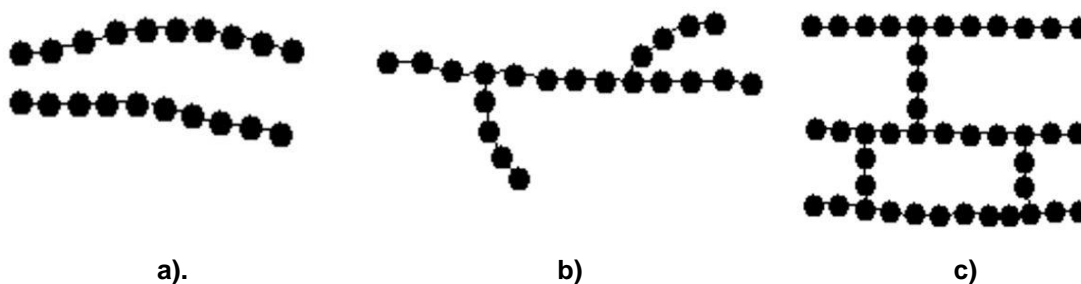
O primeiro polímero sintético foi desenvolvido por Baekeland em 1907, que lhe atribuiu o nome comercial baquelite. A baquelite e outros polímeros desenvolvidos até aos anos 20 foram obtidos através de tentativa e erro e não existia ainda conhecimento sobre a influência da estrutura molecular nas propriedades desses polímeros [10] [6].

Em 1920 Staudinger apresentou o conceito de que os polímeros seriam compostos por cadeias longas, constituídas por um grande número de unidades moleculares unidas por ligações covalentes. No entanto este conceito não foi imediatamente aceite por outros cientistas e apenas mais tarde surgiram provas experimentais resultantes das investigações desenvolvidas pelo próprio Staudinger, que lhe valeram o Prémio Nobel da Química [11], e também por Carothers [6] [12] [13].

Staudinger publica em 1928 um artigo onde comprova experimentalmente o seu conceito para a estrutura dos polímeros [12]. Em 1929 e 1931 Carothers publica dois artigos que ajudam a confirmar a estrutura proposta por Staudinger e onde compreende e define os dois tipos de polimerização, a polimerização por adição e por condensação, classificação que persiste até aos dias de hoje [12] [14] [4]. Como resultado destes estudos foi aceite pela comunidade científica que os polímeros são macromoléculas. Com a aceitação e evolução dos conceitos apresentados por Staudinger e Carothers foi possível o desenvolvimento de novos polímeros com aplicação comercial [6] [13].

Os polímeros podem ter estruturas lineares, quando não existem ramificações na cadeia ou ramificados, quando existem ramificações. Os polímeros ramificados apresentam menor resistência mecânica que os lineares. Existem ainda polímeros reticulados, que resultam de ligações cruzadas entre as moléculas. Estes polímeros apresentam uma maior resistência mecânica e são insolúveis [3] [15].

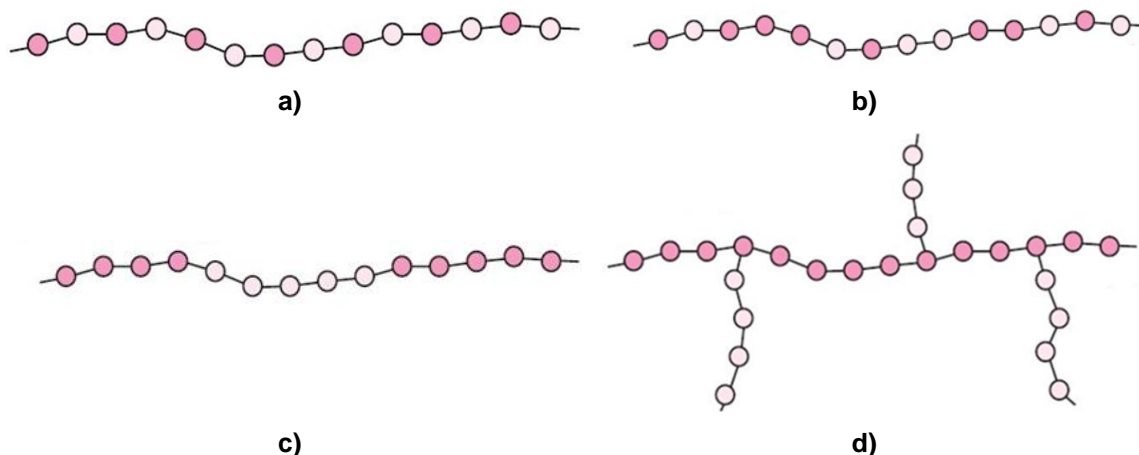
Figura 1.1: Representação esquemática dos diferentes tipos de estruturas de polímeros: a). Linear b) Ramificada c) Reticulada (adaptado de [16])



Os polímeros podem ser compostos por apenas por um tipo de monómero, os homopolímeros. Os polímeros compostos por dois tipos de monómeros são definidos como copolímeros. Os copolímeros podem se classificar de acordo com a organização dos seus monómeros. Existem copolímeros aleatórios, copolímeros alternados, copolímeros em bloco e copolímeros graftizados ou enxertados. Nos copolímeros aleatórios os monómeros organizam-se aleatoriamente. Os copolímeros alternados são caracterizados por uma sequência, segundo a qual os dois tipos de monómeros se organizam. Nos copolímeros em bloco os monómeros

iguais agrupam-se em blocos relativamente longos. Por fim os copolímeros graftizados ou enxertados caracterizam-se por uma cadeia principal formada por um dos monómeros, à qual se ligam cadeias formadas apenas por o outro tipo de monómero [6] [3].

Figura 1.2: Representação esquemática tipos de copolímeros: a) Alternado b) Aleatório c) Bloco d) Graftizado ou enxertado (adaptado de [17])



Podem ser considerados dois tipos polímeros, de acordo com o tipo de polimerização, os obtidos através de polimerização por condensação e os obtidos através de polimerização por adição. Na polimerização por condensação obtêm-se polímeros cujos monómeros são diferentes dos monómeros que lhe dão origem, pois durante essa reação são retirados alguns átomos ou moléculas a esses monómeros. Nos polímeros obtidos por adição os seus monómeros são iguais aos que lhe deram origem [12] [3].

1.1.1 Polímeros de elevado peso molecular solúveis em água

Os polímeros solúveis em água são substâncias possíveis de dissolver em água de forma a obter soluções com propriedades físicas modificadas, permitem, por exemplo, aumentar a viscosidade dessa solução. Existem polímeros solúveis em água sintéticos e naturais [18].

O peso molecular dos polímeros tem crescido ao longo do tempo, como se pode verificar consultando várias patentes, registadas desde os anos 50 até à atualidade, referentes à produção de polímeros de elevado peso molecular. Em 1961 é registada uma patente relativa à preparação de poliacrilamidas com peso molecular superior 12×10^6 g/mol [19]. Numa patente de 1975 é descrito um método para obtenção de poliacrilamidas com peso molecular entre 8×10^6 e 20×10^6 g/mol [20]. Numa patente registada em 1987 onde é descrito um método para obter poliacrilatos de elevado peso molecular, com valores superiores a 20×10^6 g/mol [21]. Em 1996 é publicada uma patente onde é descrito um método para produzir poliacrilamidas com peso molecular até 34×10^6 g/mol [22]. Hoje em dia, polímeros com peso molecular superior a 10^7 g/mol, ainda que existam polímeros com peso molecular muito superior a esse valor, são considerados polímeros de elevado peso molecular [23] [24].

A utilidade destes polímeros como modificadores de propriedades em soluções deve-se à sua dimensão molecular e ao volume que ocupam quando dissolvidos [23].

As propriedades obtidas numa solução polimérica estão diretamente relacionadas com a estrutura das cadeias de polímero, as unidades que o constituem e com o seu peso molecular [25]. A solubilidade do polímero é dependente da sua estrutura e das unidades que o constituem, nomeadamente da presença de grupos hidrófilos na cadeia polimérica [26]. A solubilidade é também afetada pelo peso molecular, sendo que maior peso molecular significa uma menor solubilidade [27].

Os grupos funcionais são grupos de átomos presentes em moléculas orgânicas e conferem propriedades físicas e químicas específicas a essas moléculas. Nos grupos funcionais estão presentes, para além de carbono e de hidrogénio, átomos como azoto, oxigénio, enxofre, fósforo e halogéneos, são estes átomos que conferem as propriedades típicas de cada grupo funcional. Os grupos hidrófilos são grupos funcionais que absorvem ou se ligam com a água, esta propriedade deve-se à presença de átomos que permitem a ligação com os átomos de hidrogénio da água [28] [29].

Nas décadas de 30 e 40, pouco tempo após os avanços verificados na compreensão do processo de polimerização, da estrutura dos polímeros e da sua influência nas propriedades dos mesmos, começaram a ser desenvolvidos polímeros com o objetivo de serem solúveis em água. Eram já conhecidos os efeitos desses polímeros na viscosidade das soluções, ainda que não fossem conhecidas ainda aplicações para essas soluções [30]. No entanto rapidamente, logo nos anos 50, surgiram várias aplicações para os polímeros solúveis em água, bem como vários estudos sobre as propriedades das soluções obtidas e sobre a solubilidade dos polímeros [31] [32] [33].

Graças às suas propriedades os polímeros solúveis em água podem ser utilizados como agentes espessantes, aumentam viscosidade de uma solução, ou floculantes, aglutinam pequenas partículas em suspensão [34]. Estas características significam que podem ser aplicados em várias áreas, tais como tratamento de águas residuais [35] [36], na indústria do papel [37] [38], em fluidos de perfuração e estabilização de solos [39] [40], controlo de erosão de solos em agricultura e construção civil [41], na indústria farmacêutica [42] [18], fraturamento hidráulico para extração de petróleo e gás natural [43] [44].

Estes polímeros estão disponíveis comercialmente na forma de soluções aquosas [24], emulsões [45] e pós [46]. Os polímeros em forma de pó podem ter maior peso molecular que os polímeros em emulsão e principalmente que os polímeros em solução aquosa, permitem um período de armazenagem mais longo e também uma maior percentagem de material ativo. A percentagem de material ativo nos polímeros em pó pode ser superior a 95%, contra valores em torno de 50% para as emulsões e 5% para as soluções aquosas [47] [48].

1.1.1.1 Propriedades reológicas de soluções poliméricas

A reologia estuda a deformação e escoamento da matéria. O estabelecimento da reologia como um ramo separado da Física é devido ao trabalho de Bingham, que também criou essa expressão [49].

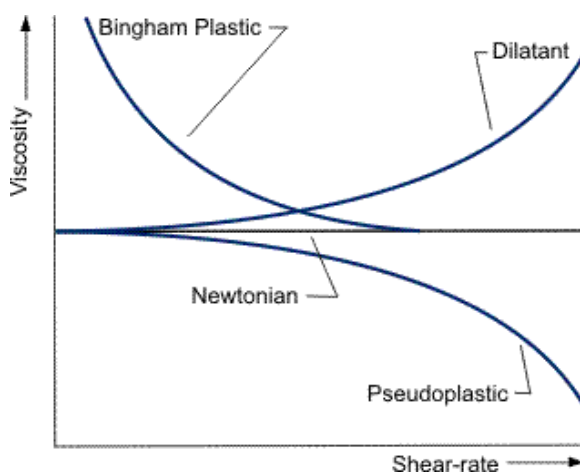
Os fluidos podem ser classificados conforme o seu comportamento reológico, podem ser newtonianos ou não-newtonianos. Os fluidos newtonianos têm uma relação linear entre a tensão de corte aplicada e a taxa de deformação angular, a constante que as relaciona é a viscosidade [50]. Essa relação é definida pela Equação 1.1.

$$\tau = \mu * \gamma \quad (1.1)$$

Onde τ é a tensão de corte (Pa), μ a viscosidade (Pa.s) e γ a taxa de deformação angular (s^{-1}) [50].

Os fluidos não-newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão de corte aplicada e a taxa de deformação angular, como tal a sua viscosidade não é constante e varia com a taxa de deformação angular ou com a tensão de corte a que o fluido for sujeito. Estes fluidos podem ser caracterizados por vários modelos matemáticos, conforme o tipo de comportamento apresentado [51]. Existem três classificações para os fluidos não-newtonianos, podem ser viscoelásticos, fluidos dependentes do tempo ou fluidos independentes do tempo [50], no entanto esta classificação é algo arbitrária, pois a generalidade dos fluidos não-newtonianos apresentam comportamentos que se incluem nas várias categorias [51].

Figura 1.3: Comportamento dos fluidos independentes do tempo com deformação angular [52]



Os fluidos independentes do tempo podem classificar-se como pseudoplásticos, dilatantes ou viscoplásticos. Nos fluidos pseudoplásticos, os mais comuns entre os independentes do tempo, verifica-se uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de deformação angular. Nos fluidos dilatantes a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de deformação angular. Por fim os fluidos viscoplásticos caracterizam-se por só se deformarem ou fluírem após ser atingida a tensão de cedência (τ_0) [51].

Os fluidos pseudoplásticos e dilatantes podem ser caracterizados pela lei da potência (Equação 1.2).

$$\tau = k\gamma^n \quad (1.2)$$

Onde τ é a tensão de corte (Pa), γ a taxa de deformação angular (s^{-1}), K é o índice de consistência ($Pa.s^n$) e n o índice de comportamento de escoamento [50].

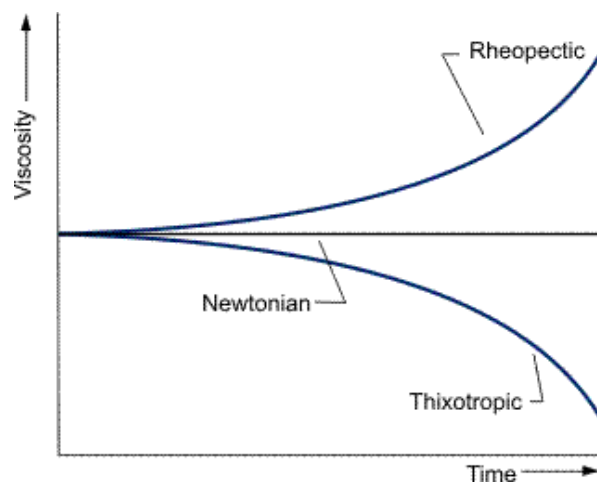
Os fluidos viscoplásticos podem ser caracterizados pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1.3).

$$\tau = k\gamma^n + \tau_0 \quad (1.3)$$

Onde τ é a tensão de corte (Pa), γ a taxa de deformação angular (s^{-1}), K é o índice de consistência ($Pa.s^n$) e n o índice de comportamento de escoamento e a tensão de cedência (τ_0) [50].

Os fluidos dependentes do tempo classificam-se em tixotrópicos e reopéticos. Os fluidos tixotrópicos vêm a sua viscosidade diminuir ao longo do tempo, quando sujeitos a uma taxa de deformação constante. Nos reopéticos ocorre um aumento da viscosidade quando sujeitos a uma taxa de deformação constante [50] [51].

Figura 1.4: Comportamento dos fluidos dependentes do tempo com deformação angular [52]



Os fluidos viscoelásticos podem tanto apresentar comportamento de sólidos elásticos como de fluidos viscosos [50].

Os comportamentos reológicos mais comuns nas soluções de polímeros de elevado peso molecular são o comportamento pseudoplástico e o comportamento viscoplástico [32] [53] [54] [55].

Uma força de 0,01N consegue quebrar um milhão de cadeias poliméricas em solução, assim se explica a sensibilidade dessas soluções às tensões de corte e o seu comportamento pseudoplástico [56].

Os polímeros de elevado peso molecular podem ser utilizados como agentes de controlo reológicos, pois permitem, quando em solução, obter elevadas viscosidades [53] [57]. As moléculas dos polímeros, o soluto, têm dimensões muito superiores às moléculas do solvente, a água. Quando um polímero é colocado num solvente a suas cadeias entrelaçam-se, graças às forças inter e intramoleculares existentes entre essas cadeias. Se as interações entre polímero e solvente forem mais fortes do que as ligações entre cadeias de polímeros, essas cadeias absorvem moléculas de solvente. Quando as cadeias de polímero absorvem moléculas de solvente aumentam o seu volume, limitando a sua mobilidade e aumentando a fricção interatômica, assim se explica a elevada viscosidade das soluções poliméricas. [58] Também a concentração de polímero influencia a viscosidade, pois maiores concentrações promovem maior interação entre as cadeias, aumentando assim a fricção interatômica e consequentemente a viscosidade. [59].

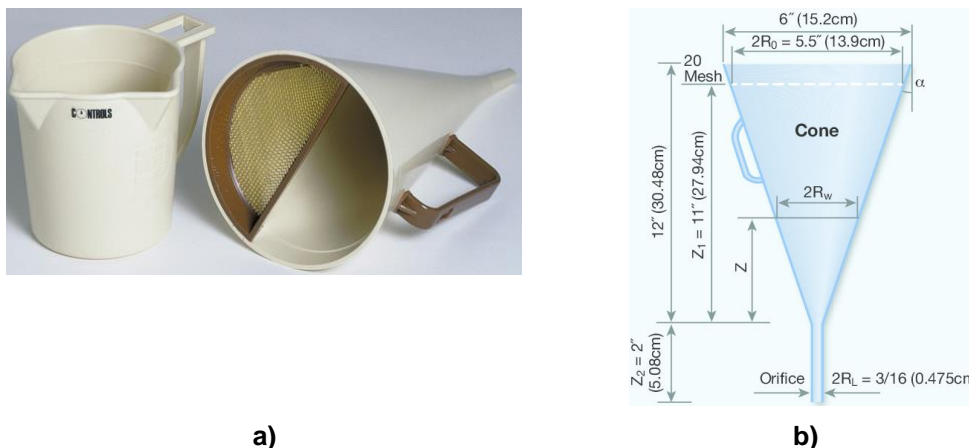
A partir dos anos 50 realizaram-se vários estudos, em diferentes polímeros, onde se identificaram algumas das propriedades reológicas de soluções poliméricas e onde também é referida a importância destas propriedades na utilização industrial das soluções poliméricas. Nestes estudos observou-se a diminuição da viscosidade das soluções quando sujeitas a elevadas taxas de deformação angular, comportamento correspondente ao dos fluidos pseudoplásticos [33] [60] [61].

Existem várias formas de medir a viscosidade de um fluido. Entre elas podemos encontrar os viscosímetros e dentro destes existem vários tipos. Alguns viscosímetros mais comuns são o capilar [62], o rotacional [63], o vibracional [64] e o de esfera descendente [65]. O viscosímetro capilar baseia-se no escoamento laminar do fluido através de um tubo de pequeno diâmetro, e com comprimento várias vezes superior ao diâmetro. É possível calcular a tensão corte e a taxa de deformação angular, que dependem apenas das dimensões do tubo e da diferença de pressão entre a entrada e a saída. Conhecendo a tensão de corte e a taxa de deformação angular é possível calcular a viscosidade [62]. Um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos permite determinar a viscosidade de um fluido, relacionando as dimensões de um cilindro e o binário necessário para fazê-lo rodar a uma certa velocidade angular dentro desse fluido, que se encontra num recipiente cilíndrico. [62]. O viscosímetro vibracional mede a viscosidade de um fluido relacionando-a com a força necessária para manter um oscilador em vibração com amplitude constante, dentro desse fluido. [64]. Nos viscosímetros de esfera descendente a medição da viscosidade é feita largando uma esfera dentro do fluido do qual se pretende medir a viscosidade. A esfera irá atingir a velocidade terminal, o que significa que a resultante das forças gravítica, de impulsão e de arrasto é igual a zero. A força de arrasto depende da viscosidade e através da resultante entre as 3 forças é possível calcular a viscosidade [65].

Para além dos métodos já referidos para medição viscosidade, existem também a medição com funil de Marsh. Este método foi desenvolvido por Marsh para avaliar as propriedades de lamas de perfuração, a viscosidade é determinada pelo tempo de escoamento do fluido contido

no funil, como tal trata-se de este método fornece medições comparativas [66]. O funil de Marsh é recomendado pelo American Petroleum Institute, na norma API RP 13B-1, para determinar a viscosidade de fluidos de perfuração. A norma API RP 13B-1 explica a utilização do funil de Marsh e regulamenta as suas dimensões [67].

Figura 1.5: a) Funil de Marsh (adaptado de [68]) b) Dimensões do funil de Marsh de acordo com norma API RP 13B-1 (adaptado de [69])



1.1.1.2 Dissolução de polímeros solúveis em água

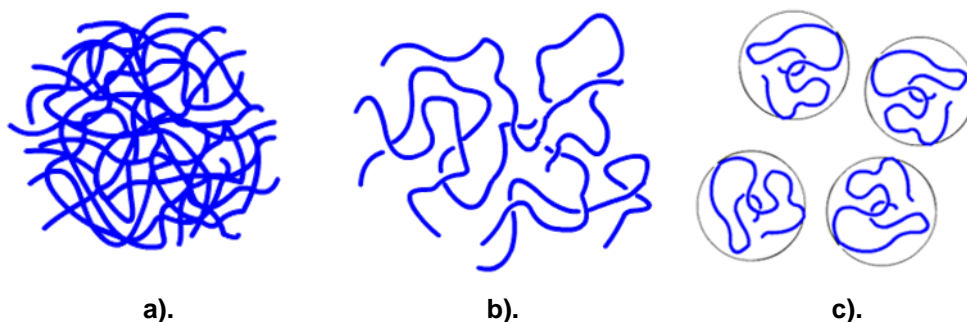
Em 1962 Ueberreiter apresenta, dividido por dois artigos, um dos primeiros estudos relativos à dissolução de polímeros, onde já são definidas as fases da dissolução de um polímero e os fenómenos físicos e químicos que se desenvolvem durante essas fases. Nesse estudo Ueberreiter avalia também as variáveis que afetam a solubilidade, tais como o peso molecular dos polímeros e o solvente utilizado [70] [71].

A dissolução de polímeros inicia-se com a dispersão e molhagem das partículas de polímero, seguidamente ocorre a hidratação (swelling) do polímero e por fim a dissolução, que corresponde à hidratação completa do polímero [58] [72]. Durante a dispersão e molhagem dá-se o contato das partículas de polímero com o solvente. Esta fase é essencial para uma dissolução eficaz do polímero, durante a molhagem é necessário que cada partícula de polímero esteja em contacto com o solvente [72]. Para que a molhagem seja eficaz é necessário dispersar o polímero em partículas individuais, sem que exista redução da dimensão das partículas e degradação molecular [73]. Após a molhagem ocorre a hidratação. Durante a hidratação ocorre a difusão das moléculas de solvente no polímero, este é hidratado, mas não dissolvido; formando, uma camada superficial de gel. Na fase da dissolução ocorre a desintegração da camada de gel e a transformação dessa camada e do polímero nela contido numa verdadeira solução [12].

A dissolução de um polímero depende do “desenrolamento” das suas cadeias, fenómeno que depende das dimensões das cadeias e como tal do peso molecular do polímero. Quanto maior for o peso molecular maior o tempo de dissolução [74].

Quando um polímero é colocado dentro de um solvente forma-se em torno das suas partículas, tal como já foi referido, uma camada de gel. Nessa camada de gel, as cadeias de polímero estão completamente “enroladas”, no limite entre a camada de gel e o solvente as cadeias estão parcialmente “desenroladas”. Quando o polímero se encontra dissolvido, as suas cadeias estão completamente “desenroladas” e movem-se livremente no soluto [42].

Figura 1.6: Representação das várias fases da dissolução de um polímero (adaptado de [58])
a). Moléculas do polímero em estado sólido logo após adição ao solvente b). Moléculas do polímero hidratado c) Moléculas dissolvidas e dispersas no solvente



Se um polímero em pó for simplesmente colocado dentro de água, sem qualquer tipo de agitação, formam-se aglomerados que isolam o polímero seco do solvente impedindo a sua molhagem, formando “olhos de peixe” [2]. Se este fenómeno acontecer durante a fase de molhagem, torna-se impossível de dissolver o polímero, por mais que se agite a mistura. [75] [76] [72]. A hidratação de um polímero em pó é controlada pela imbibição capilar, fenómeno que causa a infiltração do solvente entre e dentro das partículas de polímero, se a imbibição não for heterogénea formam-se então os “olhos de peixe” [77]. Para fazer face a esta situação o polímero deverá ser composto por partículas da menor dimensão possível, com diâmetro menor do que 1 mm [24], deverá ser adicionado lentamente enquanto a solução é sujeita a agitação vigorosa, assim o polímero será bem disperso no solvente, conseguindo-se uma boa molhagem [75] [58] [78] [79]. As partículas devem ser de pequena dimensão, porque um certo volume de um material composto por partículas de pequena dimensão tem maior área superficial do que o mesmo volume de material, mas composto por partículas de maior dimensão, o que resulta numa maior área de exposição ao solvente [80]. Considerando uma partícula esférica com raio R e uma partícula com raio $2R$, a esfera com raio $2R$ tem uma área superficial 4 vezes superior à da esfera com raio R , mas um volume 8 vezes superior. Para perfazer o volume de uma esfera com raio $2R$ são necessárias 8 esferas com raio R , essas 8 esferas em conjunto tem uma área superficial que é o dobro da área superficial da esfera com raio $2R$.

Figura 1.7: Exemplo de “olhos de peixe” numa solução de carboximetilcelulose (adaptado de [81])



1.2 Sistemas de mistura

O processo de mistura é definido como o movimento aleatório entre duas fases inicialmente separadas. É uma operação realizada em muitas indústrias e com vários objetivos, como mistura de líquidos e sólidos, redução de aglomerados de partículas e acelerar reações químicas [82].

O comportamento não-newtoniano da solução a agitar e a necessidade de dispersar um pó num solvente são dois dos principais fatores que podem dificultar um processo de mistura. As dificuldades associadas à mistura polímeros em pó já foram reduzidas graças aos métodos de mistura que têm sido desenvolvidos, no entanto são muito difíceis de eliminar totalmente e em resposta a isso continuam a ser apresentadas novas soluções [83].

A generalidade dos fluidos não-newtonianos apresentam elevadas viscosidades. Fluidos com elevadas viscosidades podem produzir escoamentos pouco turbulentos, o nível de turbulência pode ser avaliado pelo número de Reynolds, neste caso é apresentado o nº de Reynolds para escoamentos resultantes de mistura com impulsores (Equação 1.4), que é inversamente proporcional à viscosidade do fluido. Quanto menor o valor de Reynolds, menor a turbulência do escoamento, para valores de Reynolds inferiores a 2100 o escoamento pode ser considerado laminar. Se o fluido for muito viscoso, escoamento com baixa turbulência, o movimento imposto pelo sistema de mistura não se propaga pelo fluido, o que significa que é difícil obter uma mistura homogênea. Um escoamento num fluido viscoso pode também causar elevadas tensões de corte, pois para uma determinada deformação do fluido, a tensão de corte que se desenvolve durante a mistura é tanto maior quanto maior a viscosidade do fluido, esta relação pode ser ilustrada pela lei da potência (Equação 1.2), que descreve o comportamento dos fluidos pseudoplásticos [84].

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (1.4)$$

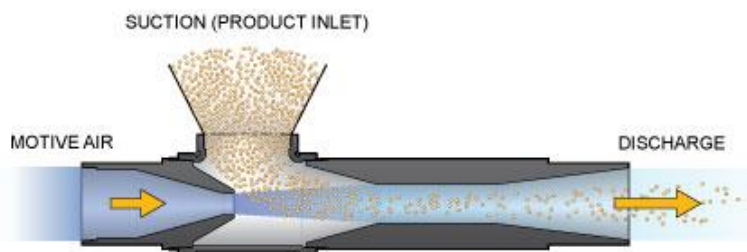
Onde ρ (kg/m^3) é a massa volúmica do fluido, N (rad/s) a velocidade de rotação do impulsor, D (m) o diâmetro do impulsor e μ (Pa.s) a viscosidade do fluido [85].

A dispersão de materiais em pó num líquido é um processo bastante difícil de aplicar a nível industrial, um material em pó quando adicionado num tanque de solvente pode ter tendência a acumular-se à superfície do líquido, o que significa que não se dará a molhagem das partículas. Caso o pó se acumule na superfície do líquido, serão necessárias horas para conseguir submergi-lo. Ainda que se consiga submergir as partículas de pó, estas terão tendência, como já foi referido no capítulo relativo à dissolução de polímeros, a formar aglomerados [86].

Os primeiros métodos desenvolvidos para fazer face às dificuldades da dissolução de polímeros de elevado peso molecular consistiam na utilização de polímeros em emulsão, obtidos a partir dos polímeros em pó. Esses métodos descrevem o modo de obter as emulsões [45] [87]. No entanto, como já foi referido, os polímeros em pó apresentam, apesar da dificuldade de dissolução, vantagens em relação às emulsões, como tal surgiram vários métodos para dispersar pó em água. Os primeiros métodos propostos para a dispersão de pó em líquidos eram de aplicação geral, não era especificado o tipo de pó a dispersar [88], mais tarde foram desenvolvidos vários métodos especificamente para dispersão de polímeros em pó, todos eles promovendo a dispersão do polímero sem recorrer a agitadores mecânicos [89] [90] [91].

Existem sistemas de mistura de polímeros que não utilizam agitadores mecânicos. Por exemplo, o sistema descrito na patente apresentada por Markfelt, em 1974, utiliza um escoamento de ar, que é utilizado para aspirar o polímero, utilizando para esse efeito um edutor. O escoamento de ar, em conjunto com o polímero em pó, mistura-se com o escoamento da água utilizada na solução, dispersando assim o polímero na água [91]. Um edutor funciona com base no princípio de Venturi, um fluido escoando através dum estrangulamento acelerando e criando uma zona de vácuo, como resultado o produto a misturar, neste caso polímero em pó, é aspirado [92].

Figura 1.8: Edutor para materiais em pó (adaptado de [93])

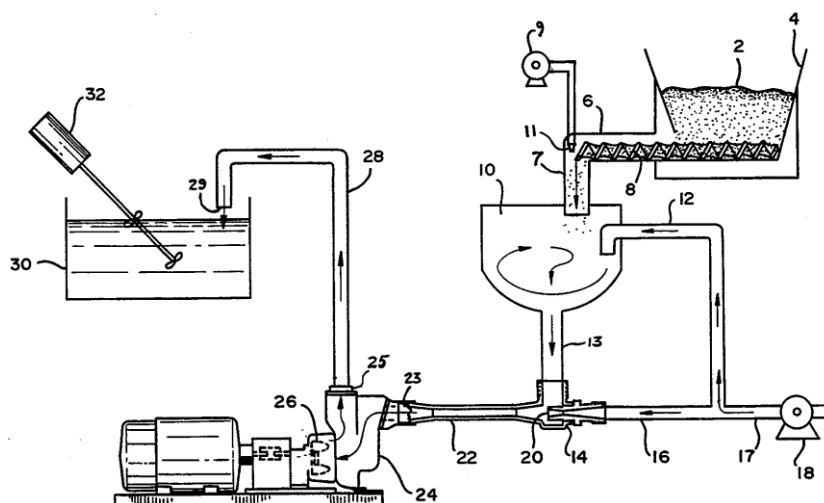


Muitos dos sistemas de mistura utilizam um agitador mecânico onde o polímero é hidratado e por fim completamente dissolvido. Nestes sistemas o polímero é disperso na água utilizando diversos sistemas, alguns utilizando o escoamento da água utilizada como solvente [46] [75],

outros utilizando uma combinação do escoamento de água com um agitador mecânico e com ar comprimido [72] [94].

Na patente apresentado por Larwick, em 1994, é descrito um sistema de dispersão. Neste sistema o polímero em pó introduzido numa câmara de vórtices, utilizando ar comprimido. Nessa câmara o polímero é misturado com água, iniciando-se a fase de molhagem e formando uma pasta, composta, sobretudo, por polímero por dissolver. A pasta formada é introduzida no escoamento de água utilizando um edutor, promovendo a sua dispersão. A água e o polímero são introduzidos, por meio de uma bomba centrífuga, num tanque de mistura com um agitador mecânico. A dispersão do polímero na água é completa com a passagem na bomba centrífuga, graças às tensões de corte a que o fluido é sujeito nessa bomba. No tanque de mistura ocorre a dissolução do polímero e completa-se o processo de mistura [72].

Figura 1.9: Sistema de dispersão descrito na patente de Larwick mostrando o contentor de polímero (4), a câmara de vórtice (10), o edutor (14 e 20), a bomba centrífuga e o tanque de mistura (30) (adaptado de [72])



Existem sistemas que podem servir de alternativa aos agitadores mecânicos, como o método proposto por Gupta que utiliza ondas de rádio para promover a hidratação do polímero [95] ou utilizando ar comprimido, como por exemplo, o sistema pulsair [96].

1.2.1 Agitação mecânica

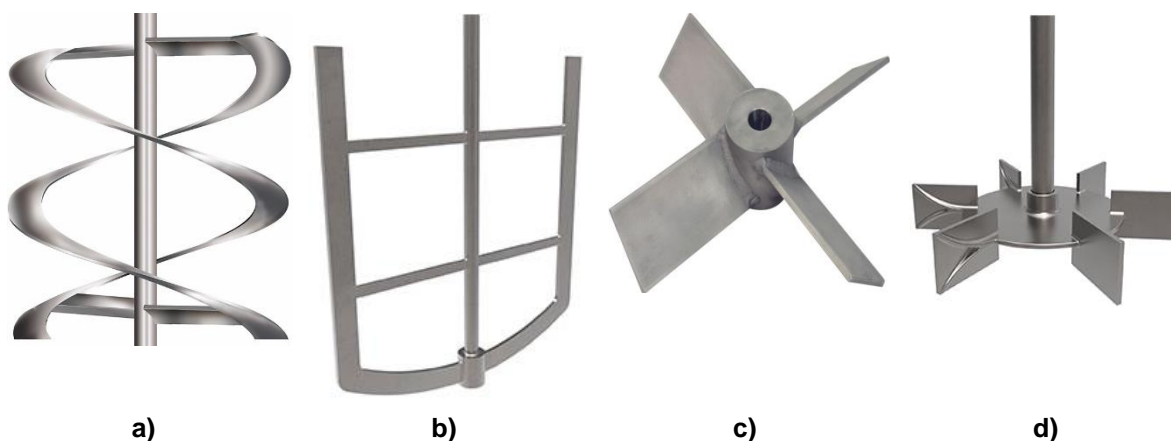
Um agitador mecânico é composto por um motor, normalmente elétrico, um redutor de velocidade, um veio e pelo impulsor. O tanque também pode ser considerado parte do agitador, e caso a mistura seja feita num tanque fechado é necessário um vedante na entrada do veio no tanque [97].

Existem vários tipos de agitadores mecânicos ou impulsores. Os impulsores helicoidais e os de âncora produzem escoamentos tangenciais e são adequados para misturar fluidos com elevada viscosidade e para fluidos pseudoplásticos [98]. Existem também vários tipos de turbinas, que produzem escoamentos radiais e proporcionam elevadas tensões de corte [99].

Os impulsores de fluxo axial são normalmente hélices ou turbinas e são apropriados a fluídos de baixa viscosidade, não criam tensões de corte elevadas e são utilizados para manter partículas sólidas em suspensão [82] [100] [101].

Na agitação de soluções poliméricas utilizando impulsores, é aconselhável utilizar velocidades de rotação moderadas (800 a 1200 rpm), pois elevadas velocidades de rotação implicam elevadas tensões de corte. As tensões de corte podem resultar, como já foi referido, na quebra das cadeias de polímero, o que pode resultar em até 50% de redução de viscosidade [78]. Os impulsores para fluidos de elevada viscosidade são concebidos para trabalhar a velocidades de rotação ainda inferiores às referidas, no caso dos impulsores de âncora a velocidade não deve ultrapassar as 300 rpm [102] e nos impulsores helicoidais a velocidade deverá ser inferior a 200 rpm [103].

Figura 1.10: Tipos de impulsores. a) Impulsor helicoidal (adaptado de [104]) b) Impulsor de âncora (adaptado de [98]) c) Impulsor axial (turbina) (adaptado de [105]) d) Impulsor radial (turbina Rushton) (adaptado de [106])

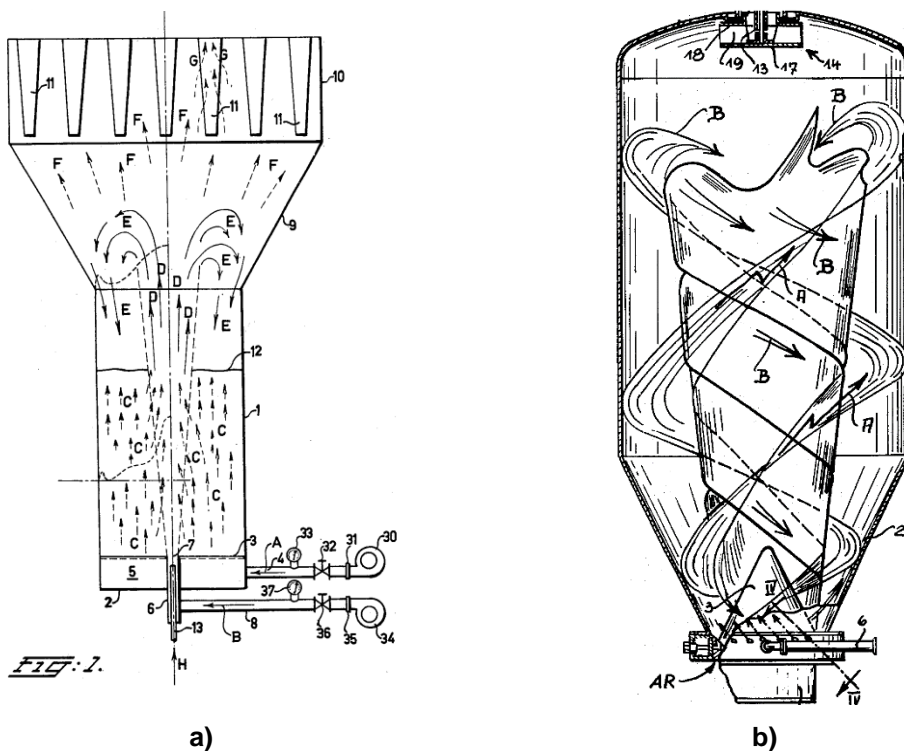


1.2.2 Agitação com ar comprimido

Os sistemas de mistura com ar comprimido eram até ao final dos anos 60 utilizados para misturar sólidos em forma de pó ou granulado ou para adicionar e misturar pequenas quantidades de fluido nesses pós, existem várias patentes relativas a esses métodos. Como a patente apresentada por Samler, em 1955, referente a sistema para misturar uma pequena porção de fluido com sólidos em pó [107], a patente (nº 3,159,383) de Munster, apresentada em 1964, que se refere a um sistema que mistura o material utilizando um jato de ar ascendente, que entra no fundo do contentor de mistura através de um leito fluidizado, este jato de ar cria uma corrente de convecção dentro do contentor, que mistura os materiais. Este sistema permite também misturar pequenas quantidades de líquido com os sólidos em pó, sendo que o líquido é transportado no jato de ar [108]. Na patente (nº 3,179,379) apresentada em 1965, por Grün, é descrito um sistema para mistura de sólidos em pó num contentor com fundo cónico. Este sistema utiliza um conjunto de saídas de ar dispostas radialmente no fundo do contentor e apontadas para o eixo do tanque. No fundo do tanque existe um cone. A disposição das saídas

de ar, em conjunto com o cone, significa que não existem zonas do contentor onde se acumulem os sólidos, e permitem criar um vórtice de ar que promove uma mistura eficaz dos conteúdos do contentor [109].

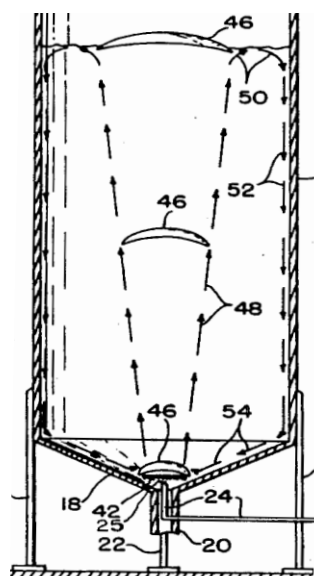
Figura 1.11: a) Desenho do sistema da patente nº 3,159,383, mostrando a entrada de ar no contentor (7) e as correntes geradas pelo jato de ar (adaptado de [108]). b) Desenho do sistema da patente nº 3,179,379, mostrando as entradas de ar, o cone e o vórtice de ar (adaptado de [109]).



As primeiras patentes referentes à agitação ou mistura de líquidos com ar comprimido datam do início dos anos 70, tratam-se de duas patentes apresentadas por Rothermel, e publicadas em 1970 e 1971. Estas patentes são referentes a sistemas utilizados para a mistura de amostras biológicas e para esse fim utilizam bolhas de ar [110] [111]. Em 1979 é patenteado por Cabrera um sistema para regular a frequência e dimensão de bolhas de ar para mistura de líquido. Nessa patente é descrito brevemente o funcionamento e os problemas encontrados nos sistemas das patentes apresentadas por Rothermel [110] [111], esses sistemas utilizam um fluxo contínuo de ar que apenas consegue gerar bolhas muito pequenas, da ordem dos 1000 aos 3000 micrones de diâmetro, no entanto para aplicação desejada eram necessárias bolhas maiores. A mistura realizada utilizando bolhas maiores era necessária, porque as amostras a misturar contêm partículas microscópicas. É pretendido fazer uma análise da amostra e caso existam bolhas microscópicas, resultantes de um fluxo de ar contínuo ou de turbulência criada pela ação de mistura, essas bolhas, por terem dimensões semelhantes às das partículas, podem conduzir a uma análise que apresenta resultados pouco precisos [112]. Procurando criar bolhas de dimensão superior Cabrera apresentou a patente para um sistema de controlo que liberta o ar em forma de pulsos discretos conseguindo obter bolhas individuais e com volumes de 0.5cm³, uma dimensão até 1000 vezes superior à obtida nos sistemas patenteados por Rothermel [110] [111]. Estas bolhas de dimensão superior sobem rapidamente

através do líquido e promovem a sua mistura [112]. Anteriormente, em 1972, Gondo apresenta um artigo relativo ao estudo da formação de bolhas de ar de grande dimensão, de 5 cm e 10 cm, e dos seus efeitos na mistura de uma solução utilizando uma montagem experimental, onde conclui que a eficácia da mistura depende do diâmetro da coluna de bolhas, é proporcional à velocidade das bolhas e à sua frequência [113].

Figura 1.12: Desenho do sistema pulsair patenteado em 1986, mostrando a entrada de ar no tanque (25), a placa acumuladora (42), a bolha formada (46) e a corrente gerada (48;50;52;54) (adaptado de [115])



Em 1986 foi patenteado por Richard Parks o sistema de mistura hoje conhecido por pulsair. Esse sistema utiliza bolhas de ar de grande dimensão, em versões mais recentes do sistema diâmetros de aproximadamente 15 cm a 75 cm [114], para promover a mistura do líquido. O grande avanço deste sistema foi a utilização de placas acumuladoras, que permitem um desenvolvimento mais eficaz das bolhas [115].

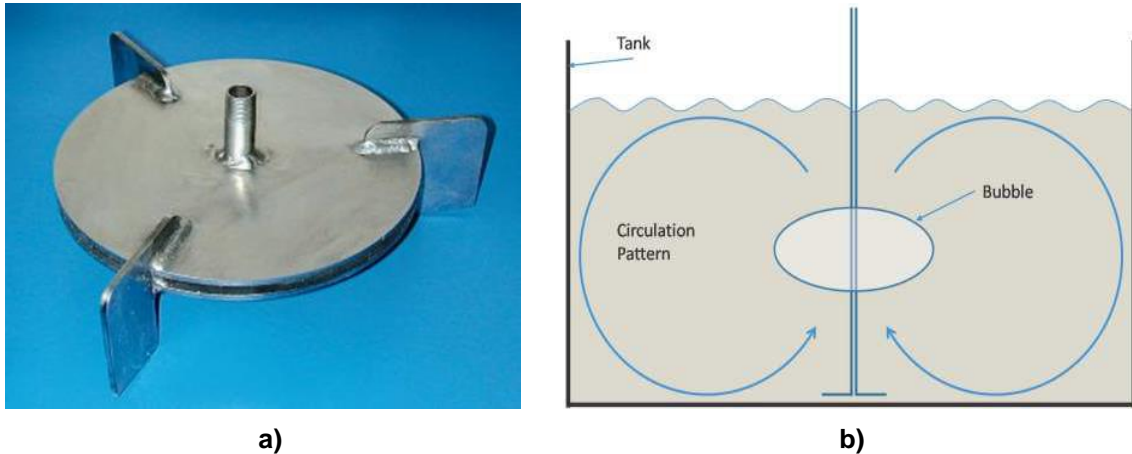
Richard Parks patenteou em 2003 um sistema que pode ser considerado uma evolução do apresentado do pulsair, mas que inclui uma válvula em conjunto com a placa acumuladora, com o objetivo de impedir o entupimento do sistema quando utilizado em meios com partículas suspensas [116].

1.2.2.1 Sistema pulsair

O sistema pulsair utiliza placas acumuladoras circulares dispostas no fundo de um tanque, a estas placas é fornecido ar comprimido, cujo fornecimento é controlado por válvulas que permitem gerar pulsos de ar. [117]. As placas, o seu posicionamento, perto do fundo do tanque, e o fornecimento do ar em pulsos são fatores que permitem o crescimento rápido de bolhas ar de grande dimensão que, por serem menos densas que o líquido a agitar, sobem até à superfície agitando-o. As bolhas ao subirem até à superfície arrastam consigo o líquido, quando atingem a superfície deslocam o líquido, arrastando-o através da superfície e causando um movimento descendente junto das paredes e novamente até ao fundo do tanque, assim

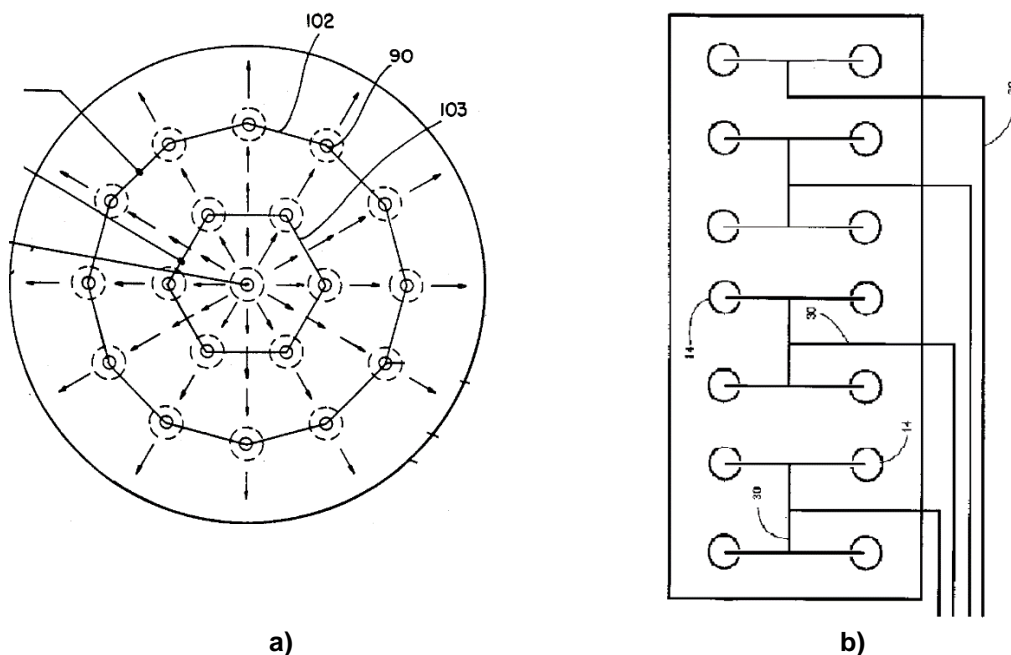
consegue-se promover a mistura de todo o líquido [118]. As placas acumuladoras permitem formar bolhas de forma planar, a bolhas planares tem uma área de seção cerca de 4 a 6 vezes superior à área de seção de uma bolha esférica com o mesmo volume, o que significa que as bolhas planares são mais eficazes na deslocação do líquido e como tal permitem uma mistura mais completa do líquido [115] [119]. As placas acumuladoras são constituídas por um par de placas sobrepostas [117].

Figura 1.13: a) Placa acumuladora do sistema pulsair (adaptado de [120]) b) Escoamento criado no fluido pelo sistema pulsair (adaptado de [121])



Para que as correntes criadas pelas bolhas em ascensão misturem todo o conteúdo do tanque poderá ser necessário utilizar várias placas acumuladoras. O número de placas e a sua disposição no tanque dependem da geometria do tanque, das propriedades do líquido a misturar e da dimensão das placas [122].

Figura 1.14: Disposição das placas acumuladoras em sistemas pulsair a) Disposição das placas no sistema descrito na patente de Parks (adaptado de [115]) b) Disposição das placas no sistema patentado por Koopmans (adaptado de [122])



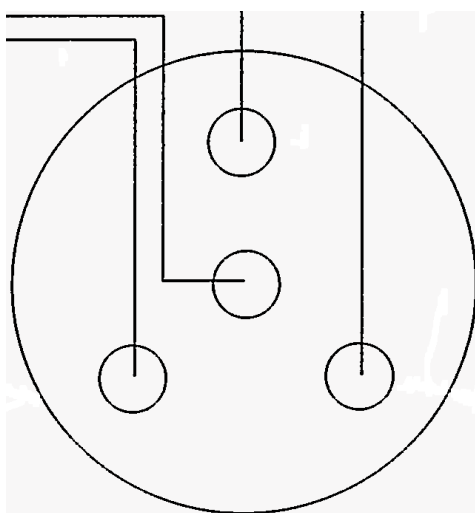
Algumas das disposições possíveis são ilustradas na patente de Parks, publicada em 1986 e na patente de Koopmans, publicada em 2010. Na patente de Parks as placas são dispostas em círculo no tanque circular, existe uma placa central e o resto das placas está organizado em dois conjuntos dispostos a diferentes distâncias do centro do tanque. A injeção de ar nas placas é feita de forma sequencial a partir do centro do tanque [115]. Na patente de Koopmans, que utiliza um tanque de mistura retangular, as placas estão dispostas em duas linhas paralelas [122].

Alguns dos estudos com mais informação sobre o sistema Pulsair e os seus parâmetros são relativos à aplicação deste sistema na suspensão de partículas sólidas. O primeiro desses estudos, apresentado por Powell, foi composto por dois testes, um deles com o objetivo de avaliar a capacidade do sistema manter em suspensão uma lama da argila e o outro com o objetivo de suspender a lama de argila quando acumulada no fundo do tanque. Os testes foram executados num tanque cilíndrico de 1,9 m de diâmetro e uma altura de líquido de 0,8 m, foi utilizado um conjunto de 13 placas acumuladoras. Foram testados dois diâmetros de placas, 152 mm e 76 mm, e duas pressões de operação diferentes, 3,4 bar e 6,9 bar. Os autores puderam concluir que o sistema Pulsair, utilizando as placas maiores e a pressão mais elevada, é eficaz a manter a lama em suspensão, com 80% em massa do conteúdo sólido a ser mantido em suspensão. Já para suspensão da lama coesa acumulada no fundo do tanque o sistema revelou-se menos eficaz, com apenas 54% em massa do conteúdo sólido a ser mantido em suspensão. Foi também verificado que a placa acumuladora central foi mais eficaz na suspensão da lama, pois devido ao modo como feita a alimentação das placas, as outras placas recebiam um caudal de ar inferior [123] [124].

Como continuação do trabalho apresentado por Powell foi realizado pelo mesmo autor outro estudo do sistema Pulsair, que se divide em duas etapas. Em primeiro lugar foi determinada a relação entre R Pulse, o raio do pulso de ar criado numa placa acumuladora, com os parâmetros do sistema Pulsair, diâmetro da placa acumuladora, diâmetro do tubo de ar e pressão do ar. Foi também estudada a capacidade do sistema manter em suspensão uma lama de argila e também de suspender a lama quando acumulada no fundo num tanque cilíndrico com diâmetro de 5,7 m. Os testes para determinação da correlação entre R Pulse foram executados num tanque cilíndrico com diâmetro de 1,9 m e uma altura de água de 0,6 m. Foram testadas placas com diâmetro de 61 mm a 366 mm, pressão de ar de 1,4 bar a 6,9 bar e tubos de ar com diâmetro de 3,2 mm a 40,9 mm. Com estes testes os autores concluíram que um maior diâmetro da placa, maior pressão do ar, maior diâmetro dos tubos de ar (até certo valor) traduzem-se num R Pulse superior [125] [123]. No teste para avaliação da capacidade de suspensão foram utilizadas 4 placas com 910 mm de diâmetro, alimentadas por tubos de 2,5", as placas foram dispostas de acordo com a **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** Foram testadas pressões de 1,4 bar e 5,5 bar. No primeiro teste de manutenção das partículas em suspensão foi utilizada uma pressão de 5,5 bar e placa central foi alimentada separadamente das outras placas, com um tempo entre pulsos de 30 s, com estes parâmetros foi conseguida a suspensão de 87% em massa das partículas. Com a redução da pressão para

1,4 bar, diminuiu também a percentagem de partículas em suspensão, para 82%. No teste para suspensão da lama depositado no fundo do tanque, com pressão de 1,4 bar, a percentagem de sólidos em suspensão foi de 78% em massa, no teste a 5,5 bar foi essa percentagem foi 83%. Este estudo permitiu aos autores concluir que as correntes das bolhas em ascensão permitem a agitação de todo o volume do tanque e assim a suspensão de partículas sólidas. Foi concluído também que o sistema Pulsair permite a suspensão de lamas coesas depositadas num tanque com fundo plano. Foi testada a correlação criada para determinar R Pulse, que se apresentou de acordo com a realidade. Os autores comprovaram também a fiabilidade do sistema, pois realizaram testes ao longo de vários dias, sem qualquer avaria [123] [124].

Figura 1.15: Disposição de placas acumuladoras utilizada no teste de suspensão de sólidos (adaptado de [123])



Como já foi referido o valor de R Pulse e também dimensão das bolhas formadas são dependentes do caudal de ar, os principais parâmetros que afetam o caudal são o diâmetro das placas, a pressão do ar e o diâmetro dos tubos de ar. Verifica-se que um maior diâmetro da placa, maior pressão do ar, maior diâmetro dos tubos de ar (até certo valor) traduzem-se num maior raio das bolhas [125] [123]. As variáveis referidas são relacionadas com R Pulse através da equação 1.5. [124]. O espaço entre as placas tem pouca influência na dimensão da bolha, desde que tenha um valor mínimo que está relacionado com o diâmetro do tubo de ar [123]. A eficácia da mistura é também dependente da velocidade de ascensão da bolha através do líquido a misturar [122]. Outros parâmetros do sistema que podem ser considerados são o tempo de injeção de ar nas placas e o tempo entre esses pulsos de ar. O tempo de injeção deverá ser curto, menor do que 1s. O tempo pulsos pode ser determinado pelo intervalo de tempo que a bolha formada demora a atingir a superfície [115]. O tempo de injeção utilizado no estudo realizado por Powell para a determinação de R Pulse foi de 0,4 s, mas é também referido que após 0,1 s de injeção, o pulso de ar formado já atingia R Pulse [121] [123].

$$R_{pulse} = 0.8 \times D_{placa}^{0.31} \times \Delta P^{0.39} \times D_{tubo}^{0.51} \quad (1.5)$$

O sistema pulsair possui várias vantagens em relação a outros métodos, tais como a inexistência de peças móveis dentro do tanque, baixo custo de operação e dos equipamentos e facilidade de manutenção [119] [123] [121].

O sistema pulsair é utilizado em várias áreas como geração de bolhas em piscinas para treino de salto ornamental [126], vinicultura [127] [128] e na indústria do petróleo, para mistura de petróleo e de lubrificantes [129].

1.3 Análise CFD

Os primeiros passos na área da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) foram dados nos anos 50 por Francis Harlow, que desenvolveu um método *Particle-In-Cell* que permitia simular escoamentos em 2 dimensões [130] [131].

O primeiro método a conseguir simular escoamentos em 3 dimensões foi apresentado num artigo publicado em 1967 pela Douglas Aircraft Company [131]. O método referido foi desenvolvido com vista à simulação de escoamento potencial incompressível, em torno de corpos de várias formas [132].

Em 1981 era apresentado um dos primeiros protótipos de um programa de computador de aplicação geral na área da mecânica de fluidos e da transmissão de calor. O programa continha um código de base que deveria permitir a resolução de equações governantes das áreas referidas, existindo também códigos específicos, que trabalhavam em conjunto com a base, para cada tipo de problema a resolver, incluindo a simulação de escoamentos com duas fases [133].

Com os avanços tecnológicos e o aumento da capacidade dos computadores possibilitaram o desenvolvimento de novos softwares com melhores capacidades e mais fáceis de utilizar, nas duas últimas décadas generalizou-se a utilização da análise CFD, que passou a ser aplicada em diversas áreas [134].

A análise CFD permite simular escoamentos de uma só fase, transmissão de calor [135] [136], escoamentos com reações químicas [137], escoamentos com partículas [138], escoamentos em turbomáquinas [139] [140] e escoamentos multifase [141] [142] [143].

1.3.1 Análise CFD de escoamentos com duas fases

O escoamento presente na mistura de um líquido com um sistema pulsair é um escoamento de duas fases, o líquido a misturar e as bolhas de ar criadas pelo sistema [121].

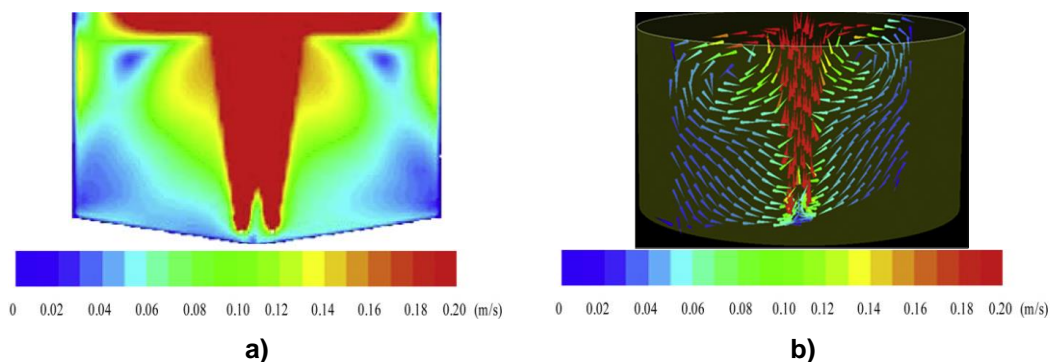
Existem hoje vários softwares comerciais que permitem simular escoamentos com várias fases, como o *ANSYS CFD* [144] [145] e o *COMSOL Multiphysics* [121] [146].

Recentemente foram apresentados diversos artigos relativos a simulações de escoamentos multifase que foram realizadas com algum sucesso. Estas simulações foram realizadas utilizando vários modelos de simulação e vários softwares. Relativamente aos modelos, foram utilizados o *volume of fluid* [121] [141] [147], o algoritmo SIMPLE [142] [143], o MUSIG [148], o *phase field* [121] e o *Euler-Euler* [147] [149]. Em relação aos softwares foram utilizados o *ANSYS CFD* [143] [148] [147], o *COMSOL Multiphysics* [121] e o *OpenFoam* [121].

Em 2009 é publicado um artigo relativo à análise CFD de um reator anaeróbico, cujo conteúdo, que apresenta um comportamento não-newtoniano, é agitado injetando hidrogénio no fundo do tanque. O fluido é descrito pela lei da potência. A modelação foi realizada recorrendo a um modelo *Euler-Lagrange*, considerando o conteúdo do tanque como uma fase contínua e as bolhas, formadas pela injeção de hidrogénio, como partículas Lagrangianas, ou seja, uma fase discreta. Quanto ao modelo de turbulência foi utilizado o modelo $k - \varepsilon$ *RNG (ReNormalization Group)*. Os autores desse estudo concluíram descrição do conteúdo do tanque utilizando a lei da potência, apresentou resultados para a viscosidade para diferentes taxas de deformação angular, que estão de acordo com a realidade. Foi possível distinguir, através do campo de escoamento do fluido, as zonas onde a mistura é mais eficaz, correspondente a maior velocidade do escoamento, das “zonas mortas”, correspondentes a menor velocidade. Através desta distinção é possível avaliar a eficácia da mistura [150].

Num artigo publicado em 2010 é apresentado por Binxin Wu um estudo sobre a aplicação da análise CFD à mistura de uma lama de resíduos, utilizando gás, num tanque de digestão anaeróbia. A lama a misturar apresenta um comportamento não-newtoniano e a mistura é realizada por meio de um tubo poroso (sparger) que liberta o gás em forma de bolhas. Para realizar a simulação foi utilizado o software *Fluent 12.0*. A modelação do escoamento foi realizada recorrendo a uma abordagem Euler-Euler, onde a lama foi considerada como a fase primária e o gás foi considerado a fase secundária. A lama foi modelada como fluido não-newtoniano, descrito pela lei da potência. Neste estudo o autor procura avaliar diferentes modelos de turbulência disponíveis no *Fluent*. Foram avaliados 12 modelos de turbulência, mas apenas 3 modelos se mostraram aplicáveis a fluidos não-newtonianos com elevada viscosidade. Os modelos aplicáveis são modelos $k - \varepsilon$ para baixos valores do número de Reynolds, estes modelos são aplicáveis em escoamentos com baixo número de Reynolds e são válidos na proximidade de paredes. No entanto a utilização destes modelos requiere elevados recursos de computação, pois é necessário a utilização de uma malha computacional muito fina. A utilização destes modelos no *Fluent* é explicada no artigo. A avaliação da intensidade de mistura é feita considerando a velocidade média da fase líquida, e também os contornos de velocidade e os vetores de velocidade [149].

Figura 1.16: a) Contornos de velocidade da fase líquida b) Vetores de velocidade da fase líquida (adaptado de [149])



Num artigo de Stenmark, publicado em 2013, é apresentada a análise CFD de um escoamento de ar e água numa tubagem com uma junção em T, escoamento que pode resultar numa separação das duas fases, nesse estudo são comparados os programas *Fluent* e *CFX*, que estão disponíveis no software comercial *ANSYS CFD*. O autor procura compreender qual dos programas e modelos numéricos disponíveis nesses programas se adequa melhor a simular o escoamento referido. Verificou-se que as frações de volume de cada fase são semelhantes para os dois programas. Ainda assim, para o caso apresentado, a separação de fases numa junção em T, o *Fluent* apresenta resultados mais precisos para a separação de fases e velocidades de escoamento, além de disponibilizar maior número de modelos numéricos, permitindo adaptar a simulação a diferentes tipos de escoamento. Por outro lado o *CFX* apresentou resultados mais estáveis e necessitou de menos iterações para os resultados convergirem [147].

Para além das abordagens *Euler-Euler*, apropriada à modelação de duas fases contínuas e *Euler-Lagrange*, para a modelação de uma fase contínua e uma fase dispersa, existe também a abordagem *volume of fluid (VOF)*. O modelo *VOF* pode-se incluir nos *Euler-Euler* e utiliza um código de cores para mostrar a fração volúmica de uma das fases, num determinado volume de controlo [147].

1.3.2 Análise CFD de mistura de fluidos não-newtonianos

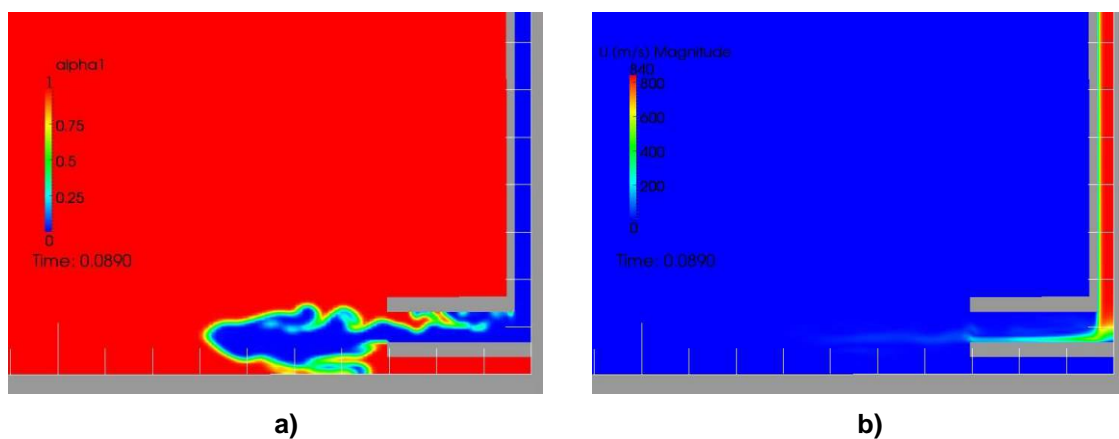
Em 2009 foi publicado por Prajapati um artigo relativo à simulação, utilizando o software *Fluent*, da mistura de uma solução de goma xantana, um polímero natural, utilizando impulsores de âncora. O autor pretendia simular, para diferentes velocidades e geometrias do impulsor e de acordo com a reologia do fluido, a variação de consumo de energia, do tempo de mistura e do padrão do escoamento. As soluções de goma xantana apresentam um comportamento pseudoplástico com tensão de cedência, que pode ser descrito pela equação de Herschel–Bulkley (Equação 1.3). Verificou-se que o comportamento do fluido descrito pelo modelo de Herschel–Bulkley causava instabilidade na simulação, como tal foi utilizado um modelo modificado. Utilizando o modelo modificado foi possível simular a mistura, e os resultados obtidos para o tempo de mistura, consumo de energia e padrões do escoamento estão de acordo com os resultados experimentais obtidos anteriormente [151].

Outro estudo foi realizado em 2011 por Pakzad, sobre a análise CFD da mistura de uma solução de goma xantana, utilizando um impulsor Scaba 6SRGT. A análise CFD foi realizada em 3 dimensões, utilizando o *Fluent* 6.3. O fluido foi modelado utilizando o modelo de Herschel–Bulkley modificado. Foi possível determinar o tempo de mistura e também determinar a taxa de deformação perto das pás do impulsor, com um erro pequeno e relação aos resultados experimentais apresentados no artigo [152].

1.3.3 Análise CFD de mistura utilizando um sistema pulsair

Num artigo publicado em 2011 por Galdamez, o autor apresenta um estudo relativo à simulação da mistura de um fluido utilizando um sistema pulsair, recorrendo à análise CFD de escoamentos multifase em duas dimensões. Foram comparados dois softwares, o COMSOL Multiphysics, onde foi utilizado um modelo *phase field* e o OpenFOAM, onde foi utilizado o modelo de turbulência *large eddy simulation* (LES). Um dos dados obtidos da simulação foi a velocidade do fluido em função da distância à placa acumuladora, verificou-se que os valores da velocidade obtidos através do método *phase field* eram muito diferentes dos valores experimentais obtidos anteriormente, com um erro relativo de 755,82%. Utilizando o modelo *large eddy simulation* foram obtidos valores de acordo com os obtidos experimentalmente, o que levou os autores a concluir que para simular misturas utilizando o sistema pulsair deve-se recorrer a modelos de turbulência [121].

Figura 1.17: Resultados obtidos utilizando o modelo de turbulência LES a) Fração de cada fase, a vermelho a fase líquida e azul a fase gasosa b) Campo de velocidades (adaptado de [121])



2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Reagentes: PolyGEO, solução aquosa de hidróxido de sódio (2,5mol/L) e soda cáustica.

Equipamentos: Viscosímetro Brookfield Modelo DV-II; Sistema pulsair; LineVac e funil de Marsh

2.2 Estratégia

A estratégia definida nesta dissertação divide-se em duas fases, uma fase computacional e uma fase experimental. Na fase computacional a estratégia passa pela escolha de um modelo multifase e de um modelo de turbulência que se adaptem à análise de bolhas de ar em ascensão, o princípio de funcionamento do sistema Pulsair. Para a validação desses modelos velocidades determinadas através da análise CFD serão comparados com velocidades determinadas experimentalmente. A estratégia relativa à parte experimental consiste na execução de testes num tanque retangular à escala com dimensões 84x41x34 cm, cerca de 2,3 vezes menor do que o tanque de scale-up. Com a execução dos testes no tanque à escala pretende-se testar vários parâmetros do sistema Pulsair e determinar quais os que permitem atingir os objetivos, ou que mais próximos ficam desses objetivos, para essa geometria. Uma vez conhecidos esses parâmetros, serão adaptados ao tanque retangular de 195x95x78 cm (tanque de scale-up), através de um scale-up, realizado a partir de correlações empíricas apresentadas na literatura. No tanque de scale-up pretende-se confirmar os parâmetros definidos através do scale-up e afinar alguns parâmetros que não tenham sido contemplados pelos critérios utilizados para realizar o scale-up.

2.3 Métodos

2.3.1 Análise CFD em 3D de bolhas de ar

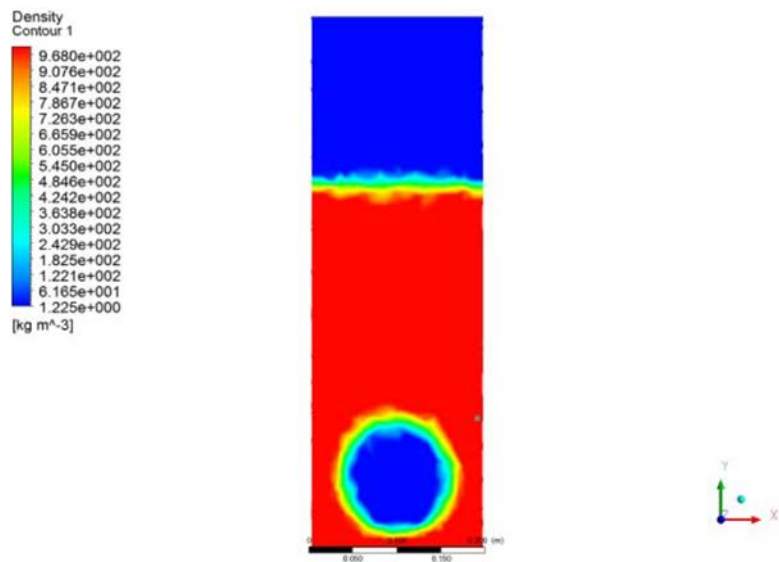
Com este conjunto de protocolos pretende-se comparar vários modelos de turbulência. Para fazer esta comparação são simuladas bolhas com o volume correspondente às bolhas formadas para determinadas condições de funcionamento do sistema pulsair.

Para a execução deste protocolo é utilizado o software *ANSYS Fluent*. A geometria, criada em Solidworks, representa um tanque circular com diâmetro de 300 mm e altura de 600 mm, que corresponde ao recipiente utilizado nos protocolos de observação das linhas de corrente. A *mesh* dessa geometria é constituída por 36331 nós e 106684 elementos e é criada utilizando o programa disponível para o efeito no *ANSYS Workbench*, onde são também definidas as superfícies onde serão aplicadas condições fronteira.

A análise é realizada com o *pressure based solver*, em regime transiente e considerando os efeitos da gravidade. O modelo multifase utilizado é o *Volume of Fluid*, combinado com um dos modelos de turbulência apresentados na tabela, sendo que a cada um desses modelos corresponde um teste.

Em *Materials* escolhem-se os materiais, neste caso ar e água ou fluido não-newtoniano que segue a lei da potência. As propriedades do ar e da água são importadas da base de dados do *Fluent*. Em *Phases*, a água é definida como fase primária e o ar é definido como fase secundária. Para definir as propriedade do fluido não-newtoniano é necessário ativar o modelo da lei da potência, através da linha de comando, e definir, em *Materials*, as constantes da lei da potência determinadas na caraterização reológica da solução de PolyGEO (2.3.6).

Figura 2.1: Domínio utilizado para a análise CFD de bolhas



Para criar as bolhas é definida uma região para ser preenchida com ar, utilizando a função *Mark/Adapt Cells*. O mesmo método é utilizado para definir a altura do fluido dentro do tanque. Para iniciar a solução utiliza-se a *Hybrid Inialization* e em *Patch* preenchem-se com ar as zonas correspondentes à bolha e à porção do tanque que não tem água.

De seguida, em *Calculation Activities*, definem-se os dados a gravar e por fim inicia-se a análise em *Run Calculation*. Os dados a gravar são a velocidade, a pressão, a densidade e a fração de volume de cada fase.

Os resultados obtidos são analisados utilizando o programa *CFD-Post*, disponível no *ANSYS Workbench*.

Tabela 2.1: Modelos de turbulência utilizados

Teste #	Protocolo#	Fluido	Modelo multifase	Modelo de turbulência	Volume da bolha (cm ³)
14	12	Água	VOF	<i>k-epsilon standard</i>	471
15	12	Água	VOF	<i>k-epsilon RNG</i>	471
21	16	Não-newtoniano	VOF	<i>k-epsilon standard</i>	471
49	12	Água	VOF	<i>k-omega</i>	471

2.3.2 Protocolos experimentais de mistura de solução de PolyGEO em tanque retangular de escala reduzida

Neste conjunto de protocolos será realizada a mistura da solução de PolyGEO num tanque retangular com dimensões 82x41x34 cm. Este tanque é uma versão à escala do tanque, com dimensões 195x95x78cm, no qual terão que ser cumpridos os objetivos da dissertação.

Ao misturar a solução no tanque à escala pretende-se compreender alguns dos problemas associados à mistura num tanque retangular e com dimensões superiores às do mini-silo. Pretende-se também determinar quais os parâmetros do sistema que permitem fazer face a esses problemas e cumprir os objetivos. Os melhores parâmetros determinados deverão servir de base para o scale-up do sistema para aplicar o tanque maior.

Os protocolos serão executados com água destilada, para comparação com os dados existentes e outros onde será utilizada água da torneira, tal como especificado nos objetivos da dissertação, para determinar os parâmetros utilizados para o scale-up. Serão testadas três disposições de placas, as disposições A (Figura 2.2), B (Figura 2.3) e C (Figura 2.4).

Os passos seguintes são iguais para a execução de todos os protocolos. Em primeiro lugar monta-se o suporte, tubos de alimentação de ar e as placas acumuladoras e de acordo com as posições definidas nas figuras correspondentes a cada disposição de placas. O tanque é cheio com 80 L de água e adiciona-se 250 mL de solução de hidróxido de sódio, mede-se o pH que deverá ter um valor entre 11 e 12. Nos testes realizados com água da torneira mede-se também a concentração de carbonato de cálcio e do ião cloro, antes da adição da solução de hidróxido de sódio.

Para iniciar a agitação define-se de acordo, com os valores das tabelas de parâmetros de cada protocolo, a pressão, no regulador de pressão e os tempos de pulso e de paragem, no controlador. Após os parâmetros definidos liga-se o sistema o Pulsair. Uma vez ligado o Pulsair dispersam-se 80g de PolyGEO, utilizando o Line Vac, e deixa-se agitar durante o tempo definido nas tabelas de parâmetros de cada protocolo.

Uma vez terminado o tempo de agitação retiram-se 4 amostras das zonas definidas na imagem de cada disposição de placas apresentada e mede-se a viscosidade de cada amostra, utilizando o cone de Marsh (2.3.4).

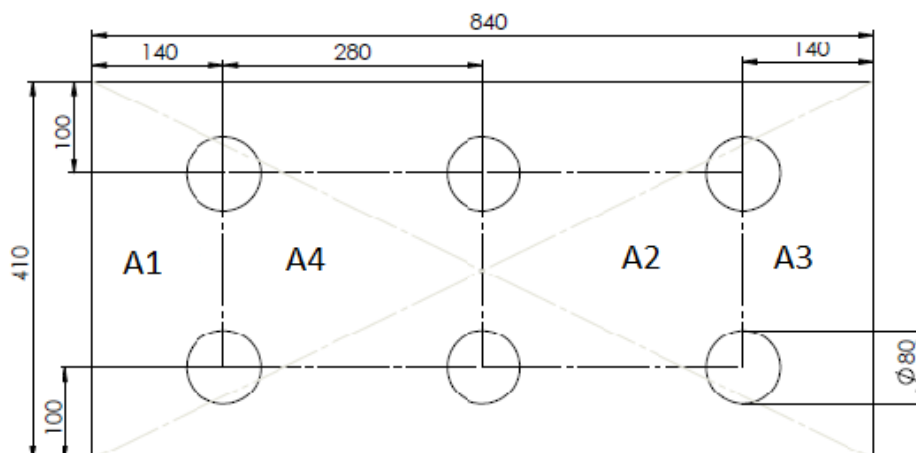
2.3.2.1 Disposição de placas A

Neste protocolo são utilizadas 6 placas, todas da mesma dimensão e dispostas em duas linhas, ao longo do comprimento do tanque. Todas as placas utilizadas neste protocolo são compostas por dois discos de plástico, com diâmetro igual ao das placas e espessura de 2 mm. As variáveis manipuladas são:

- Diâmetro das placas;
- Diâmetro dos tubos de alimentação das placas;
- Pressão do ar;

- Modo de dispersão do PolyGEO;
- Tempo de agitação.

Figura 2.2: Disposição das placas A



2.3.2.1.1 Comparação de diâmetro das placas

São comparados dois diâmetros diferentes de placas para esta disposição, 40 mm e 80 mm, todos os outros parâmetros são mantidos constantes expeto o diâmetro do tubo de alimentação que é maior para as placas de 80 mm, para garantir o enchimento das mesmas. Os ensaios realizados e os seus parâmetros são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Ensaios de comparação de diâmetros de placas acumuladoras

Teste #	T Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Nº de placas	D Placa (mm)	Pressão (bar)	D tubo (mm)
46	30	1 LV	Destilada	0,1	2	6	40	4	4
50	30	1 LV	Destilada	0,1	2	6	80	4	6,5

LV - Line Vac

2.3.2.1.2 Otimização da pressão e do modo de dispersão do PolyGEO

São comparados 4 modos de dispersar os polímeros, utilizando 1 LineVac, 2 Line Vac, dispersão manual ou dispersão com funil. Para além do modo de dispersão do polímero também é variada a pressão do Pulsair. Os testes são realizados com placas de 80 mm e todos os outros parâmetros são mantidos constantes. Os ensaios realizados são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Ensaios de otimização da pressão do Pulsair e do modo de dispersão de PolyGEO

Teste #	T Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Nº de placas	D Placa (mm)	Pressão (bar)	D tubo (mm)
50	30	1 LV	Destilada	0,1	2	6	80	4	6,5

54	30	Dispersão manual	Destilada	0,1	2	6	80	4	6,5
55	30	Dispersão com funil	Destilada	0,1	2	6	80	6	6,5
57	30	2 LV	Destilada	0,1	2	6	80	6	6,5

LV - Line Vac

Os parâmetros do pulsar variados na execução do protocolo são o diâmetro das placas acumuladoras (40 mm ou 80 mm), a pressão do ar (4 bar ou 6 bar), o diâmetro dos tubos de alimentação (4 mm ou 6,5 mm) e tempo de agitação (30 minutos ou 60 minutos). Será também variado o modo de dispersão do polímero, nomeadamente o número de Line Vac's utilizado.

2.3.2.2 Protocolo com a disposição de placas B

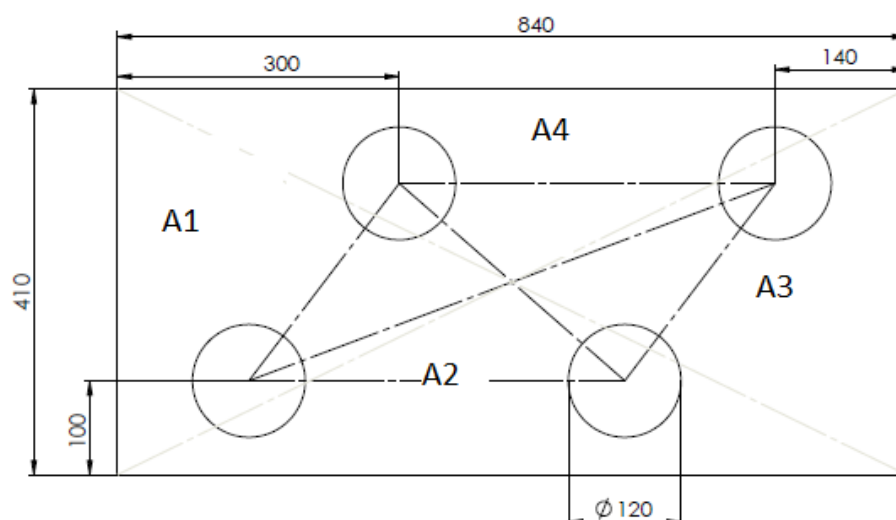
Neste protocolo são utilizadas 4 placas de 120 mm de diâmetro, dispostas segundo a Figura 2.3. Neste protocolo todos os parâmetros são fixos, pois apenas se pretende comparar a disposição de placas com as disposições utilizadas nos outros protocolos. Todas as placas utilizadas neste protocolo são compostas por dois discos de plástico, com diâmetro igual ao das placas e espessura de 2 mm. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Parâmetros dos ensaios utilizando a disposição B

Teste #	T Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff	Nº de placas	D Placa (mm)	Pressão (bar)	Diâmetro do tubo (mm)
60	30	2 LV	Destilada	0,1	2	4	120	6	6,5

LV - Line Vac

Figura 2.3: Disposição das placas B



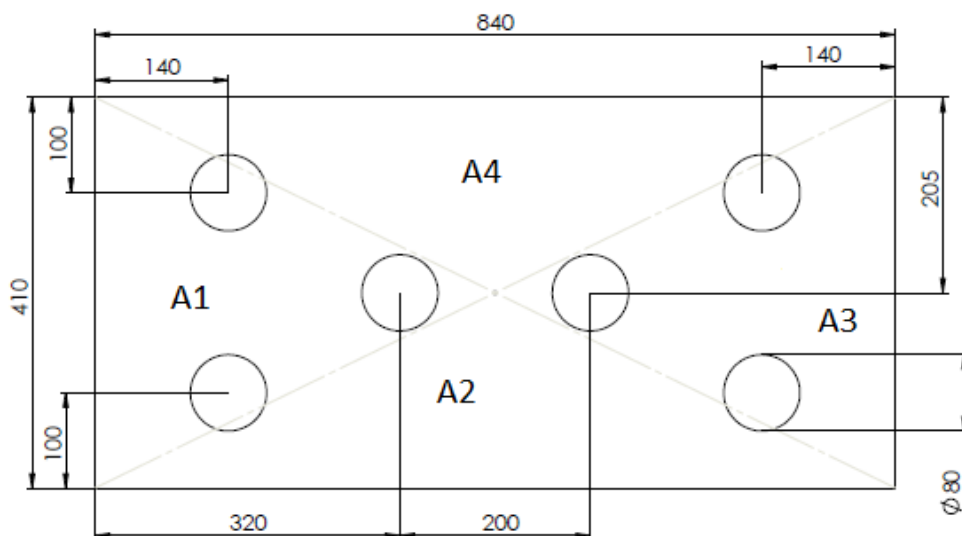
2.3.2.3 Protocolo com a disposição de placas C

Neste protocolo são utilizadas 6 placas acumuladoras, que podem ter diâmetros diferentes. Nesta disposição são colocadas 4 placas perto dos cantos do tanque e 2 placas na zona

central, esta disposição é ilustrada pela Figura 2.4. Todas as placas utilizadas neste protocolo são compostas por dois discos de plástico, com diâmetro igual ao das placas e espessura de 2 mm. As variáveis manipuladas são:

- Disposição das placas acumuladoras;
- Diâmetro das placas.
- Toff

Figura 2.4: Disposição das placas C



2.3.2.3.1 Ensaios com a disposição de placas C1

A disposição C1 utiliza 4 placas de 80 mm posicionadas nos cantos do tanque e 2 placas de 120 mm na zona central. Pretende-se comparar esta disposição com outras, assim todos os outros parâmetros são fixos e estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Parâmetros dos ensaios com a disposição C1

Teste #	T Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Nº de placas	D Placa (mm)	Pressão (bar)	D tubo (mm)
65	60	2 LV	Torneira	0,1	2	4X80 e 2X120	80 e 120	6	6,5
66	30	2 LV	Torneira	0,1	2	4X80 e 2X120	80 e 120	6	6,5
68	30	2 LV	Destilada	0,1	2	4X80 e 2X120	80 e 120	6	6,5

LV - Line Vac

2.3.2.3.2 Ensaios com a disposição de placas acumuladoras C2

A disposição C2 utiliza 4 placas de 120 mm posicionadas nos cantos do tanque e 2 placas de 80 mm na zona central. Os ensaios para esta disposição de placas serão realizados com Toff

de 2s e com Toff de 3s, todos os outros parâmetros são fixos. Os parâmetros são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Parâmetros dos ensaios com a disposição C2

Teste #	Tempo de Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Nº de placas	D Placa (mm)	Pressão (bar)	D tubo (mm)
71	30	2 LV	Destilada	0,1	2	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
72	30	2 LV	Torneira	0,1	2	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
80	60	2 LV	Torneira	0,1	2	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
81	60	2 LV	Destilada	0,1	2	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
82	120	2 LV	Destilada	0,1	2	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
84	120	2 LV	Destilada	0,1	3	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5
87	120	2 LV	Destilada	0,1	3	2X80 e 4X120	80 e 120	6	6,5

LV - Line Vac

2.3.3 Protocolos experimentais de mistura da solução de PolyGEO no tanque retangular

Neste conjunto de protocolos é feita a aplicação e validação no tanque retangular (dimensões 195×95×78cm) dos parâmetros definidos através dos testes no tanque retangular à escala e através da análise CFD.

Será executado um protocolo onde são utilizadas 6 placas. Todas as placas utilizadas neste protocolo são compostas por dois discos de fibra de vidro, com diâmetro igual ao das placas e espessura de cerca de 4mm. As placas estão dispostas de acordo com Figura 2.5.

Os parâmetros do pulsar variados na execução do protocolo são o modo de dispersão do polímero, o TOn, o modo de fornecimento de ar às placas e o tempo de agitação.

Para executar o protocolo em primeiro lugar monta-se o suporte, tubos de alimentação de ar e as placas acumuladoras e de acordo com a disposição apresentada na Figura 2.5. O tanque é cheio com 1000 L de água da torneira e mede-se a concentração de carbonato de cálcio e do ião cloro. Seguidamente adiciona-se 315 g soda cáustica e mede-se o pH que deverá ter um valor entre 11 e 12.

Para iniciar a agitação define-se, de acordo com os valores da Tabela 2.7, a pressão, no regulador de pressão e os tempos de pulso e de paragem, no relé temporizado. Após os parâmetros definidos liga-se o sistema o Pulsar. Uma vez ligado o Pulsar dispersa-se 1 Kg de PolyGEO, utilizando o Line Vac, e deixa-se agitar durante o tempo definido na Tabela 2.7. Uma vez terminado o tempo de agitação retiram-se 4 amostras das zonas definidas na Figura 2.5 e mede-se a viscosidade de cada amostra, utilizando o cone de Marsh (2.3.4).

Figura 2.5: Disposição de 6 placas no tanque grande

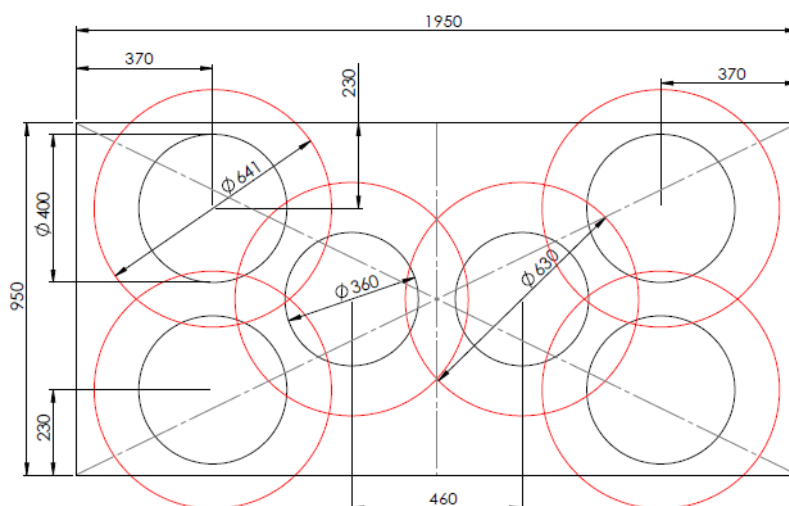


Tabela 2.7: Parâmetros do sistema Pulsair e disposição das placas acumuladoras

Teste #	T Mistura (min)	Modo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	Diâmetro do tubo (mm)
37	30	2 LV	0,1	2	6	12
38	60	2 LV	0,1	2	6	12
39	30	2 LV Grande	0,1	2	6	12
92	30	2 LV Grande	0,3	2	6	12
93	30	2 LV Grande	0,3	2	6	12

LV - Line Vac

2.3.4 Medição da viscosidade

A medição da viscosidade da solução de PolyGEO é realizada com um funil de Marsh e é realizada no fim de cada ensaio experimental. Esta medição consiste em medir o tempo que demora a escoar um volume de 1 quart (946mL) através do funil de Marsh, quando cheio com um volume de 1500 mL. Em cada ensaio são retiradas e medidas 4 amostras diferentes, o valor da viscosidade é a média destas medições.

2.3.5 Avaliação da homogeneidade da solução

Para avaliar a homogeneidade da solução são medidos os tempos de escoamento e calculados os caudais de escoamento de cada amostra (Equação 2.1) e calculado o desvio padrão (Equação 2.2) desses valores. Para a solução ser considerada homogêneas, o valor do desvio padrão deverá ser inferior a 0,3 mL/s.

$$Q \left(\frac{mL}{s} \right) = \frac{V}{t} \quad (2.1)$$

$$s\left(\frac{mL}{s}\right) = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (2.2)$$

Na equação 2.1 V é o volume, que é sempre 946 mL para todas as medições, e t o tempo de escoamento em segundos. Na equação 2.2 Q_i é o caudal de cada medição em mL/s e \bar{Q} é a média dos caudais.

2.3.6 Determinação das constantes que caracterizam o comportamento reológico da solução de PolyGEO

Com este protocolo pretende-se determinar, utilizando um viscosímetro Brookfield, as constantes da lei da potência (Equação 1.2), que descreve o comportamento reológico de fluidos pseudoplásticos. Conhecendo as constantes da lei da potência para a solução de PolyGEO, é possível realizar a análise CFD simulando um fluido com a mesmas propriedades que a solução de PolyGEO. A amostra utilizada para esta caracterização é uma solução com concentração 1g de PolyGEO por 1L de água destilada, misturada no mini-silo e com 90s/quart de viscosidade.

Utilizando o viscosímetro Brookfield obtêm-se valores de viscosidade e taxa de deformação angular para diferentes velocidades de rotação do spindle. Estas velocidades de rotação utilizadas vão desde 0,5 rpm até 5 rpm, aumentando de 0,5 em 0,5 rpm. Para determinar as constantes da lei da potência utiliza-se a lei da potência em domínio logarítmico (Equação 2.3), que corresponde a uma reta. Fazendo a regressão linear dos logaritmos da viscosidade e taxa de deformação obtêm-se a reta da lei da potência em domínio logarítmico. O declive da reta obtida corresponde ao valor de $n-1$ (n é o índice de comportamento de escoamento), e a ordenada na origem ao valor de $\log k$ (k é o índice de consistência), n e k são as constantes da lei da potência (Equação 1.2).

$$\log \mu = \log k + (n - 1) \log \gamma \quad (2.3)$$

3. DISCUSSÃO

3.1 Análise CFD em 3D de bolhas de ar

Uma das estratégias definidas para a análise CFD do sistema Pulsair foi a simulação de bolhas de ar, com volume definido pelos parâmetros do sistema que se pretende simular. Ao simular as bolhas de ar pretende-se visualizar a agitação que estas causam no fluido.

A simulação de bolhas trata-se de um problema multifase, como tal requer a utilização de um modelo multifase. No caso da simulação de bolhas separadas, como é o caso das bolhas formadas no sistema Pulsair, o modelo recomendado é o modelo *Volume of Fluid* [153].

O escoamento criado pelo sistema Pulsair é turbulento, assim para a sua análise CFD estar próxima da realidade é necessário utilizar um modelo de turbulência. Existem vários modelos de turbulência, mas nenhum desses modelos é especificamente indicado para a análise de escoamentos multifase [149]. Para avaliar qual o modelo mais adequado foram comparados três modelos dos mais utilizados. Os modelos comparados são o *k-epsilon standard*, o *k-epsilon realizable* e o *k-omega standard*.

Para fazer a comparação dos três modelos foi analisado um caso onde uma bolha de com volume de 471 cm³ ascende dentro de um tanque cilíndrico com 300 mm de diâmetro de e 600 mm de altura. O fluido do tanque foi definido como água e todos os parâmetros da simulação foram fixos, expeto os modelos de turbulência que se pretendia comparar.

Tabela 3.1: Teste para comparação dos modelos de turbulência

Teste #	Modelo de turbulência	Volume da bolha (cm ³)	Velocidade da bolha em t=0,4s (m/s)	Velocidade da bolha em t=0,8s (m/s)	Velocidade da bolha em t=1,2s (m/s)
13	<i>k-epsilon standard</i>	471	0,29	0,47	0,57
14	<i>k-epsilon realizable</i>	471	0,29	0,5	0,56
48	<i>k-omega standard</i>	471	0,25	0,38	0,48

Os modelos são comparados através dos seus campos de velocidade, que são apresentados para três de tempos de escoamento para cada modelo.

Figura 3.1: Campos de velocidade dos testes 13 e 14, após 0,4s de escoamento a) Teste 13 b) Teste 14

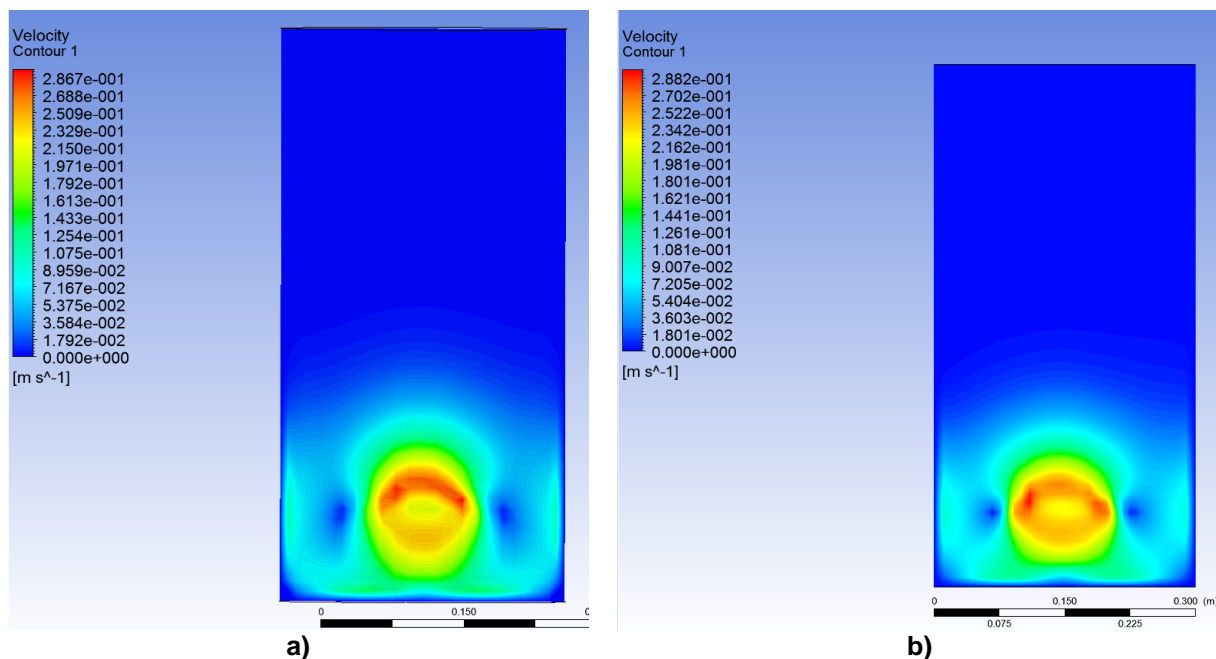
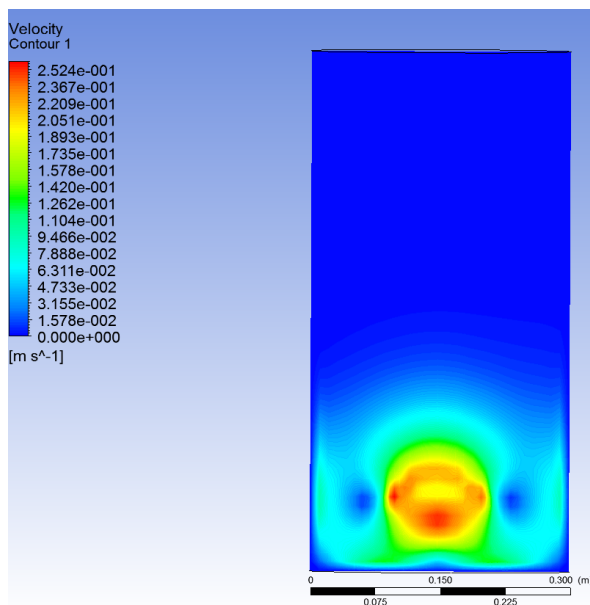


Figura 3.2: Campo de velocidade do teste 48, após 0,4s de escoamento



Comparando os campos de velocidades para um tempo de escoamento de 0,4s (Figura 3.1 e Figura 3.2), obtidos para análises realizadas com os diferentes modelos de turbulência, pode-se verificar que os contornos são bastante semelhantes e velocidades do fluido bastante próximas. Estabelecendo uma comparação entre o modelo *k-epsilon standard* (Figura 3.1-a) e o *k-epsilon realizable* (Figura 3.2-b) verifica-se que a velocidade de ascensão da bolha é de 0,29 m/s para ambos os casos, também as zonas sem movimento têm aproximadamente a mesma localização e a velocidade imposta pela bolha na água é aproximadamente igual e encontra-se 0,1 m/s e 0,15 m/s para ambos os casos. Comparando a análise realizada com o modelo *k-omega* (Figura 3.2) com as análises realizadas com os modelos *k-epsilon* verifica-se

que a velocidade da bolha é ligeiramente inferior para o modelo *k-omega*, 0,25 m/s contra 0,29 m/s. As zonas sem movimento são semelhantes para todos os modelos e as zonas agitadas também, embora no modelo *k-omega* a velocidade varie entre 0,08 m/s e 0,13 m/s, ou seja é inferior à velocidade obtida com os modelos *k-epsilon*.

Figura 3.3: Campos de velocidades dos testes 13 e 14, após 0,8s de escoamento a). Teste 13 b) Teste 14

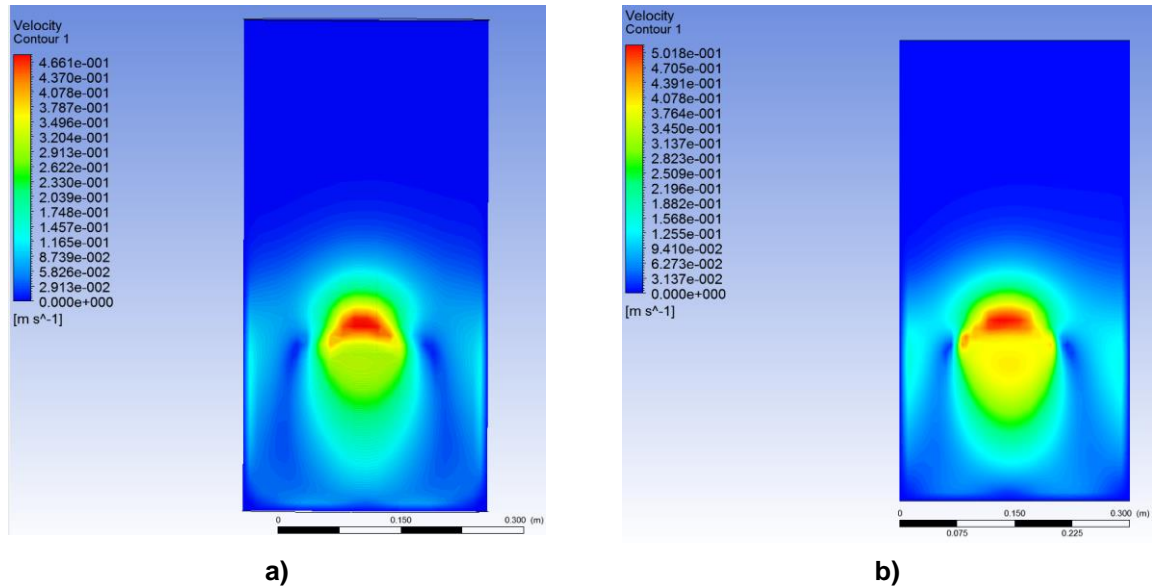
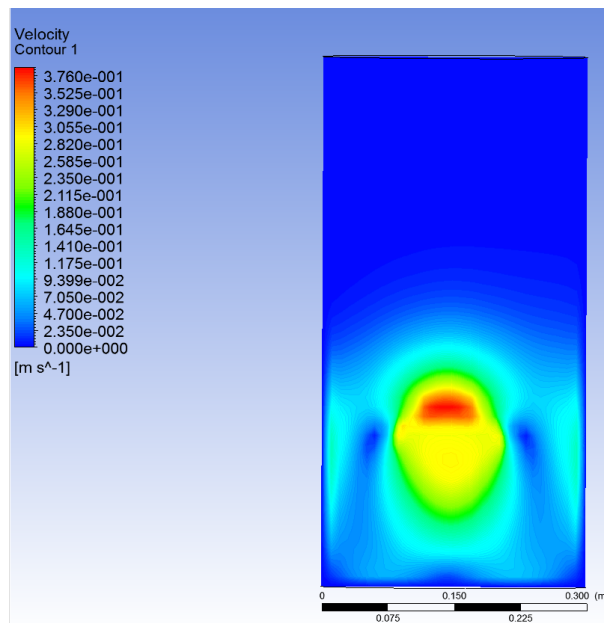


Figura 3.4: Campo de velocidades do teste 48, após 0,8s de escoamento



Os campos de velocidades para um tempo de escoamento de 0,8s apresentam maior diferença para os vários modelos, do que os campos de velocidades para um tempo de escoamento de 0,4s. Ainda assim, apesar de apresentarem valores diferentes, visualmente são bastante semelhantes. As velocidades da bolha obtidas nas simulações realizadas com os modelos *k-epsilon standard* (Figura 3.3-a) e *k-epsilon realizable* (Figura 3.3-b) são bastante próximas,

0,47 m/s e 0,5 m/s respetivamente, mas a velocidade da bolha para o modelo k - ω (Figura 3.4) é menor, apenas 0,38 m/s. As zonas sem agitação são praticamente iguais para os dois modelos k - ϵ . Na zona sob a bolha a velocidade quando se utiliza o modelo k - ϵ *realizable* é ligeiramente superior ao modelo k - ϵ *standard*, 0,25 m/s contra 0,23 m/s. Pode-se observar que com maior tempo de escoamento, os resultados obtidos com o modelo k - ω começam a distanciar-se dos resultados obtidos com os modelos k - ϵ .

Figura 3.5: Campos de velocidades dos testes 13 e 14, após 1,2s de escoamento a). Teste 13 b) Teste 14

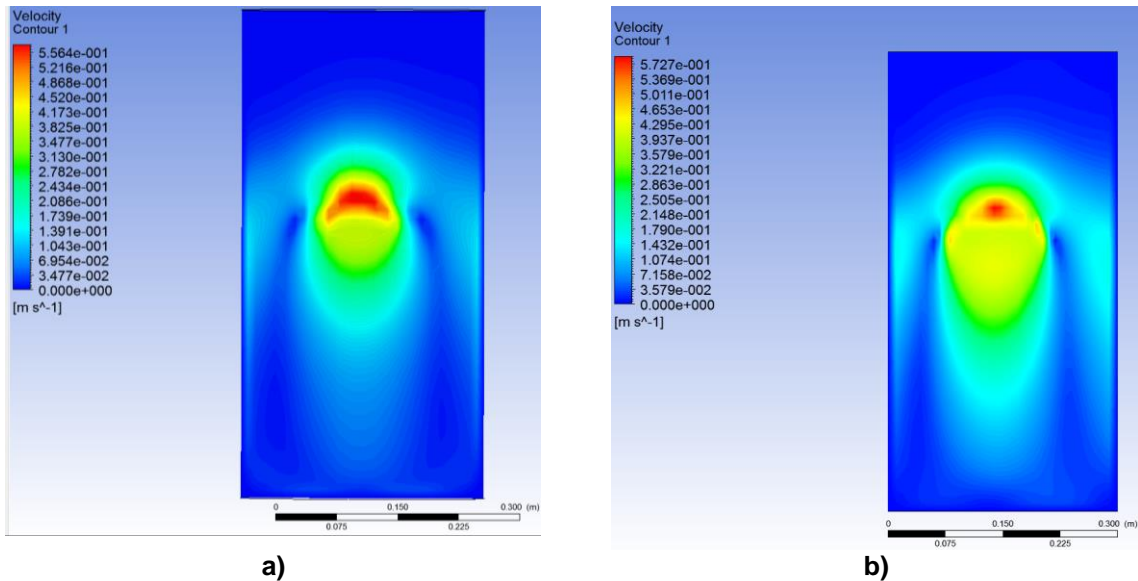
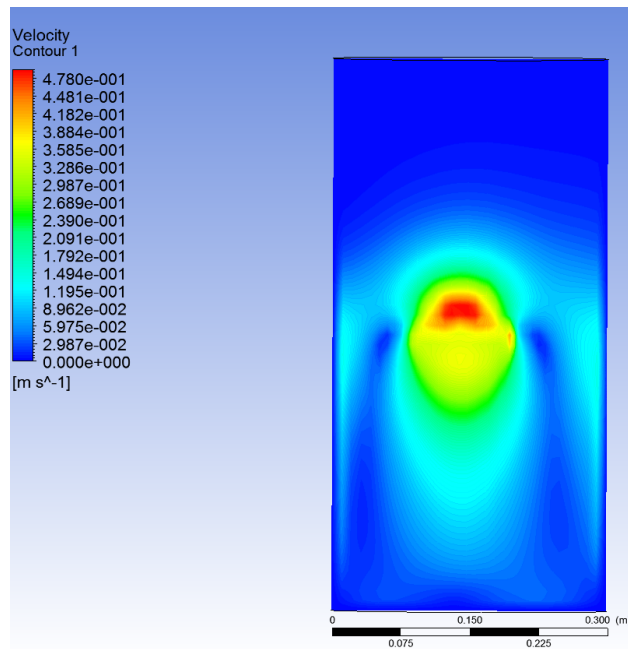


Figura 3.6: Campo de velocidades do teste 48, após 1,2s de escoamento



Os campos de velocidades obtidos para um tempo de escoamento de 1,2s apresentam as maiores diferenças entre cada modelo. A diferença entre os resultados obtidos com o modelo k - ω e os resultados obtidos com os modelos k - ϵ é significativa, principalmente na

velocidade de ascensão da bolha. A velocidade da bolha no modelo *k-omega* é de 0,48 m/s, enquanto que velocidade da bolha no modelo *k-epsilon realizable* é de 0,57 m/s. A velocidade da bolha dos dois modelos *k-epsilon* é bastante próxima, 0,57 m/s para o modelo *realizable* e 0,56 m/s para o modelo *standard*.

Considerando a diferença que existe entre os modelos *k-epsilon* e o modelo *k-omega*, foram apenas comparadas as velocidades nas zonas agitadas para os modelos *k-epsilon*. As zonas com agitação continuam a ser as mesmas para os dois modelos, mas para as mesmas regiões a velocidade é cerca de 0,05 m/s superior para o modelo *realizable*.

A proximidade de resultados entre os dois modelos *k-epsilon* levam a crer que serão os modelos que melhor permitem modelar este escoamento. Como fator de decisão entre os dois modelos, é considerado o guia teórico do *ANSYS Fluent*, onde o modelo *k-epsilon standard* é considerado o mais robusto e que envolve menos tempo de computação, pois é o mais simples, mas ainda assim permite modelar com precisão uma gama alargada de escoamentos [153].

3.2 Medição da velocidade ascensão de uma bolha de ar

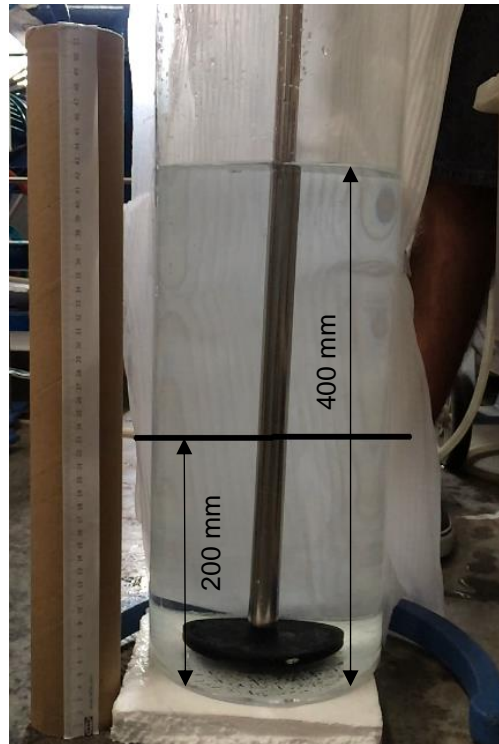
De modo a comparar uma análise CFD da agitação do fluido no mini-silo, um recipiente cilíndrico com 194 mm de diâmetro e 600 mm de altura, com o caso real, mediu-se a velocidade de ascensão de uma bolha através de uma gravação do caso real e comparou-se o resultado obtido para caso computacional.

O objetivo da comparação entre o caso real e a simulação é validar o modelo de turbulência escolhido, o modelo *k-epsilon standard*. Foi também comparado o modelo *k-epsilon realizable* com a realidade, para uma melhor justificação e confirmação da escolha do modelo *standard*.

3.2.1 Medição experimental da velocidade de uma bolha de ar

Para determinar a velocidade das bolhas formadas pelo sistema Pulsair, foi feita uma gravação do sistema Pulsair em funcionamento no mini-silo. Para execução deste teste foi utilizada uma placa de 100 mm, uma pressão de 3,5 bar, um tubo de alimentação com diâmetro de 4 mm e um TOn de 0,1 s. O mini-silo foi cheio com 12L de água, o que resulta numa coluna de água com 400 mm de altura. Considerou-se que esta altura de água permitiria desprezar os efeitos da saída do ar da placa acumuladora, posto isto, foi considerado o desenvolvimento completo da bolha a partir de meia altura da água. Para determinar a velocidade da bolha mediu-se o tempo que esta demora a percorrer a distância desde os 200 mm de altura até aos 400 mm. Para fazer a medição do tempo foi utilizado um programa de edição de vídeo, para visualizar as gravações das bolhas em ascensão frame a frame. Para servir de escala para o deslocamento da bolha foi colocada uma fita métrica ao lado do mini-silo. Os 200 mm de altura são assinalados pela linha preta na Figura 3.7.

Figura 3.7: Montagem utilizada para determinar a velocidade de ascensão de uma bolha



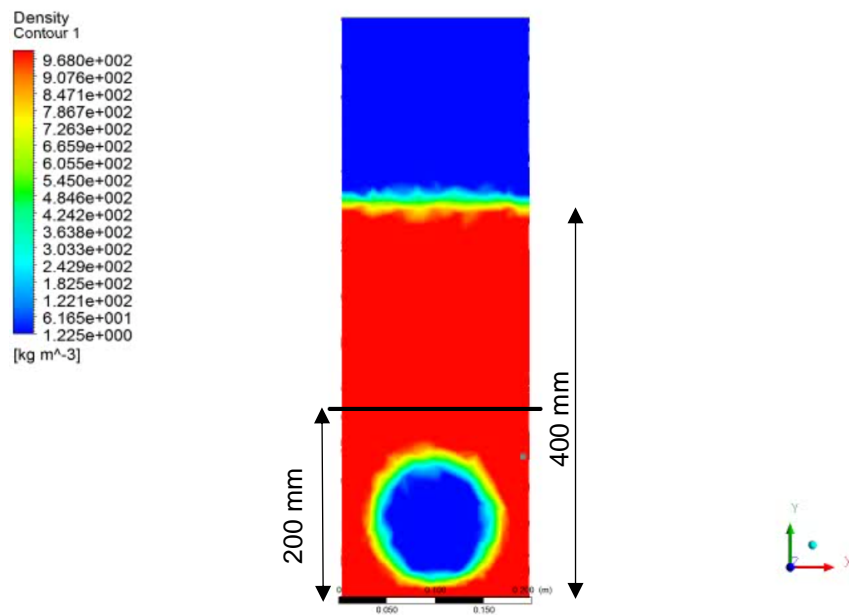
3.2.2 Medição computacional da velocidade de uma bolha de ar

Para simular a bolha formada pelo sistema Pulsair foram considerados os parâmetros utilizados no sistema Pulsair e determinado o caudal através da equação 3.1 onde Q é o caudal (L/min), S é seção do tubo (mm²) e T a temperatura do ar (°C). Através do caudal e de T_{on} é possível determinar o volume da bolha formada para os parâmetros do sistema Pulsair utilizados.

O domínio utilizado para simulação corresponde à geometria do mini-silo, preenchido com 12 L de água e é apresentado na Figura 3.8, onde as regiões a azul representam ar e a região a vermelho representa água. Neste domínio é definida uma região esférica, que é preenchida com ar e que representa uma bolha com um volume de 1 L, o que corresponde a uma esfera de raio igual a 62 mm. Para determinar a velocidade de ascensão da bolha é medido, através da visualização dos resultados em *CFD-Post*, o tempo que esta demora a percorrer a distância desde os 200 mm de altura até aos 400 mm de altura. A análise foi realizada utilizando o modelo multifase *VOF* e os modelos de turbulência *k-epsilon standard* e *k-epsilon realizable*.

$$Q = 11.1 \times S \times (P_1 + 1.01325) \times \sqrt{\frac{273}{273 + T}} \quad (3.1)$$

Figura 3.8: Domínio utilizado para simular uma bolha de ar em ascensão no mini-silo



3.2.3 Comparação de resultados experimentais e computacionais

Os resultados obtidos para a determinação da velocidade de ascensão da bolha para os casos experimental e computacional são apresentas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados da medição da velocidade de ascensão da bolha

Teste #	Tipo de teste	Modelo de turbulência	Tempo de subida da bolha (s)	Velocidade de subida da bolha (m/s)	Erro (%)
	Experimental	-	0,43	0,46	-
	Computacional	<i>k-epsilon standard</i>	0,45	0,44	4,3
	Computacional	<i>k-epsilon realizable</i>	0,48	0,42	8,7

Pode-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela 3.2 que a velocidade da bolha determinada através da análise CFD realizada com o modelo *standard* está de acordo com a velocidade da bolha determinada experimentalmente, o erro percentual entre a velocidade experimental e a velocidade computacional é de 4,3 %. Na análise CFD realizada com o modelo *realizable* os resultados estão próximos tanto da realidade, como da análise CFD com o modelo *standard*. O erro percentual da análise CFD do modelo *realizable* em relação à realidade é de 8,7%, cerca do dobro do erro obtido com o modelo *standard*, este resultado, em conjunto com a maior robustez e menor tempo de computação do modelo *standard*, levam a confirmar a opção por esse modelo [153].

Os resultados obtidos indicam que o modelo de turbulência e outros parâmetros computacionais utilizados permitem simular a agitação criada por bolhas de ar e apresentar velocidades de escoamento de acordo com a realidade.

3.3 Protocolos experimentais de mistura de solução de PolyGEO em tanque retangular de escala reduzida

3.3.1 Disposição de placas A

3.3.1.1 Comparação de diâmetro das placas

Na execução dos testes apresentados nesta seção foram fixos os seguintes parâmetros, a disposição das placas acumuladoras e o Ton e Toff, com valores de 0,1s e 2s, respetivamente. Os parâmetros variados foram o diâmetro das placas acumuladoras, foram utilizadas placas com diâmetro de 40 mm e de 80 mm, e o diâmetro dos tubos de alimentação de ar.

Com a utilização de placas de diferente diâmetro, pretendia-se avaliar o efeito do diâmetro das placas na viscosidade e homogeneidade da solução obtida.

As primeiras placas acumuladoras testadas tinham diâmetro de 40 mm, este diâmetro foi escolhido de forma a cumprir o critério 2R Pulse, considerando uma pressão de operação de 4 bar e tubos de alimentação de ar com 4 mm de diâmetro. O critério 2R Pulse refere-se à aplicação do sistema Pulsair em tanques de resíduos, onde se considera que com placas espaçadas 2R Pulse entre elas se consegue a suspensão dos sólidos depositados no fundo do tanque. O R Pulse refere-se ao raio do pulso de ar que é formada na placa acumuladora e pode ser calculado através da equação 1.5. O 2R Pulse corresponde ao raio de afetação do pulso de ar, quando sistema é utilizado para a suspensão de partículas sólidas, e é dobro de R Pulse [123].

Nos testes com placas de 80 mm foi utilizado tubo de 6,5 mm de diâmetro interno, de modo a garantir o enchimento completo das placas em 0,1 s, o TOn utilizado em todos os testes. O caudal volúmico de ar fornecido pode ser calculado através da equação 3.1, para conhecer o caudal fornecido a cada placa o valor obtido deve ser dividido pelo número de placas utilizadas.

Tabela 3.3: Testes para comparação do diâmetro das placas acumuladoras

Teste #	Dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	D Placa (mm)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
46	1 LV	Destilada	0,1	2	40	4	63±2,0	0,25±0,05
50	1 LV	Destilada	0,1	2	80	6,5	72±5,9	0,16±0,02

LV - Line Vac

Na Tabela 3.3 são apresentadas a viscosidade e homogeneidade obtidas no teste 46, onde foram utilizadas placas de 40 mm e no teste 50, onde foram utilizadas placas de 80 mm e tubos de alimentação de 6,5 mm de diâmetro.

Pode-se verificar que os resultados apresentados na Tabela 3.3 para o teste 46 estão bastante distantes dos objetivos relativamente à viscosidade, que deve ter um valor de 90 s/quart, o valor conseguido nesse teste foi de apenas 63 s/quart, ainda que cumpram a homogeneidade, que deverá ser menor que 0,3 mL/s. No teste 50, onde foram utilizadas placas de 80 mm e tubos de 6,5 mm de diâmetro, verifica-se uma melhoria na viscosidade, com valor de 72 s/quart, o que representa um aumento de cerca de 8 s/quart em relação ao teste 46. Verifica-se também uma melhoria na homogeneidade, com a diminuição do desvio padrão de 0,25 mL/s para 0,16 mL/s.

As melhorias de viscosidade e homogeneidade verificadas no teste 50 parecem indicar uma melhor dispersão e hidratação do polímero, possivelmente devido a uma maior agitação no fluido, conseguida graças aos parâmetros utilizados nesse teste, tubos de ar de 6,5 mm de diâmetro e placas acumuladoras de 80 mm.

Dos resultados pode concluir-se que os parâmetros do sistema Pulsair, escolhidos de forma a cumprir o critério 2R Pulse, não são suficientes para cumprir os objetivos. A fórmula utilizada para calcular o R Pulse é baseada em correlações obtidas para uma placa acumuladora que é alimentada individualmente por um tanque de ar comprimido. Uma vez que nos testes realizados foram utilizadas várias placas, todas elas alimentadas pelo mesmo tanque de ar comprimido, essa correlação pode não ser válida, nesses casos, para a determinação do R Pulse. Por outro lado, o critério 2R Pulse foi criado para a aplicação do sistema Pulsair à suspensão de sólidos, como tal pode não ser relevante na dissolução de polímeros, particularmente na fase de hidratação [123].

Nos testes 46 e 50, em que a dispersão foi feita com um LineVac, verificou-se que existia alguma acumulação de polímero no fundo do tanque, foi colocada a hipótese que essa acumulação seria responsável pelo valor de viscosidade longe do objetivo. A acumulação de polímero pode estar ligada com o modo de dispersão do polímero, mas também pode ser resultado da incapacidade do sistema Pulsair suspender essas partículas, pelas razões expostas no parágrafo anterior.

3.3.1.2 Otimização da pressão do sistema e do modo de dispersão do PolyGEO

Na execução dos testes apresentados nesta seção foram fixos os seguintes parâmetros, a disposição das placas acumuladoras, o diâmetro das placas acumuladoras e do tubo de alimentação de ar. Também foram fixados os valores de Ton e Toff, 0,1s e 2s, respetivamente. Os parâmetros variados são o modo de dispersão do polímero e a pressão de ar utilizada.

O modo de dispersão do polímero foi variado com o objetivo de evitar a acumulação de polímero verificada nos testes 46 e 50 e compreender como esse parâmetros afeta a

viscosidade e homogeneidade da solução obtida. Foram propostos mais três modos de dispersão do polímero, (i) dispersão manual, (ii) dispersão manual com funil e (iii) dispersão com dois LineVac's.

Para além do modo de dispersão também foi testada uma pressão maior, neste caso de 6 bar, pois surgiu a hipótese da agitação imposta ao fluido não ser suficiente, assim aumentando a pressão aumenta-se também o caudal de ar que alimenta cada placa e o tamanho das bolhas formadas, o que pode contribuir para agitação.

Tabela 3.4: Resultados dos testes de otimização da dispersão do PolyGEO e da pressão do sistema Pulsair

Teste #	Tipo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
50	1 LV	0,1	2	4	6,5	72±5,9	0,16±0,02
54	Manual	0,1	2	4	6,5	75±4,0	1,63±0,10
55	Manual com funil	0,1	2	6	6,5	76±3,4	0,92±0,12
57	2 LV	0,1	2	6	6,5	83±1,1	0,50±0,04

LV - Line Vac

Na Tabela 3.4 são apresentadas a viscosidade e homogeneidade obtidas para o teste realizado para cada modo de dispersão do polímero.

Na Tabela 3.4 pode verificar-se que no teste 54, realizado com dispersão manual, se obteve uma viscosidade de 75 s/quart, um valor ligeiramente superior ao obtido no teste 50, que foi de 72 s/quart. No entanto a homogeneidade piorou bastante, com um aumento do desvio padrão de 0,16 mL/s, no teste 50, para 1,63 mL/s no teste 54. Na comparação entre os testes 54 e 55 verificou-se um aumento da viscosidade no teste 55, com 76 s/quart, e também da homogeneidade, com um desvio padrão de 0,92 mL/s. Apesar da melhoria de resultados verificada no teste 55 a homogeneidade estava longe da conseguida no teste 50. No teste 57 realizado com dois LineVac's e com pressão de 6 bar verifica-se um aumento significativo da viscosidade, com um valor de 83 s/quart, cerca de 12 s/quart superior ao valor obtido no teste 50, embora a homogeneidade seja bastante pior que no teste realizado com apenas um LineVac, com um desvio padrão de 0,5 mL/s para o teste 57, contra os 0,16 mL/s conseguidos no teste 50.

Nos testes realizados com dispersão manual, mesmo com funil, observou-se a formação de aglomerados de polímeros, a formação de aglomerados de polímero é uma das dificuldades comuns na dissolução de polímero e indica que o polímero não foi bem disperso. Os aglomerados podem não chegar a dissolver-se, o que significa que nem todo o polímero é dissolvido [2]. Posto isto, a formação de aglomerados resulta numa menor viscosidade da solução, mas sua presença pode resultar em amostras com viscosidade mais elevada, assim o

valor médio da viscosidade aumenta. Esses efeitos da presença de aglomerados podem justificar o aumento de viscosidade e diminuição de homogeneidade verificados no teste 54, essa hipótese é sustentada pelas amostras recolhidas nesse teste, onde o valor mais elevado de viscosidade foi 87 s/quart e o mais baixo foi 64 s/quart. Ainda assim, apesar da formação de aglomerados, a acumulação de polímero no fundo do tanque foi eliminada. No teste 57 não houve formação de aglomerados nem acumulação de polímero no fundo do tanque, indicando uma dispersão eficaz do polímero.

A comparação dos resultados dos testes apresentados na Tabela 3.4 indicam que o modo de dispersão do polímero tem grande influência nas propriedades da solução obtida, como se pode verificar na comparação entre os testes 55 e 57, que utilizaram a mesma pressão mas modos de dispersão do polímero diferentes. A pressão de ar utilizada parece ter menos influência na solução obtida, pois comparando os testes 54 e 55 verifica-se que a diferença entre os resultados desse teste são próximos, apesar do teste 54 ter sido realizado com uma pressão de 4 bar e o teste 55 com uma pressão de 6 bar.

Uma vez que nenhum dos objetivos foi cumprido, apesar das melhorias conseguidas com a utilização de dois Line Vac's, colocou-se a hipótese de que com a disposição de placas A, as zonas entre as placas não seriam sujeitas a agitação, resultando assim em pior dispersão e hidratação do polímero nessas zonas e consequente perda de viscosidade e homogeneidade. Para testar essa hipótese foi criada a disposição de placas B.

3.3.2 Disposição de placas B

Esta disposição de placas foi pensada para procurar eliminar as eventuais zonas sem agitação da disposição A. Foi considerado que ao utilizar menos placas, estas teriam que ter diâmetro superior, de modo a terem uma maior área de afetação. As placas utilizadas tinham diâmetro de 120 mm, todos os outros parâmetros, exceto o tempo de mistura, foram fixos. Foram realizados testes com tempo de mistura de 30 minutos e 60 minutos, para compreender de que forma o tempo de mistura pode afetar a viscosidade e homogeneidade.

Tabela 3.5: Resultados dos testes com a disposição de placas B

Teste #	T Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Diâmetro do tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
60	30	2 LV	Destilada	0,1	2	6,5	87±0,8	0,59±0,04
63	60	2 LV	Destilada	0,1	2	6,5	83±1,0	0,36±0,05

LV - Line Vac

Comparando o teste 60 (Tabela 3.5) com o teste 57 (Tabela 3.4), ambos realizados com um tempo de mistura de 30 minutos, pode-se verificar que no teste 60, que utiliza a disposição de placas B, se conseguiu maior viscosidade, 87 s/quart contra 83 s/quart. No entanto a

homogeneidade no teste 60 piorou ligeiramente, com o desvio padrão do tempo de escoamento subir de 0,5 mL/s para 0,59 mL/s.

No teste 63, realizado com tempo de mistura de 60 minutos a viscosidade obtida foi inferior à conseguida no teste a 30 minutos, com 83 s/quart contra 87 s/quart. A homogeneidade obtida no teste 63 aumentou em relação ao teste 60, com o desvio padrão a diminuir de 0,59 mL/s para 0,36 mL/s. O teste 63 apenas foi realizado uma vez, como tal é difícil retirar conclusões desse teste, ainda assim parece lógico que com maior tempo de mistura a solução fique mais homogênea, pois um maior tempo de agitação pode permitir a dissolução e hidratação de alguns aglomerados que se tenham formado durante a dispersão do polímero.

Apesar de a viscosidade ter melhorado 4 s/quart com esta disposição e a homogeneidade ter diminuído apenas ligeiramente, com o desvio padrão do tempo de escoamento a aumentar 0,09 mL/s, os objetivos não foram cumpridos. Foi lançada a hipótese de que esta disposição de placas, embora pudesse eliminar as zonas sem agitação existentes na disposição A, criaria novas zonas sem agitação, nomeadamente nos cantos do tanque. Para testar essa hipótese e tentar eliminar essas zonas foi proposta a disposição de placas C.

3.3.3 Disposição de placas C

A disposição de placas C utiliza 6 placas, que podem ser montadas de duas formas, utilizando quatro placas de 80 mm nas posições mais próximas dos cantos do tanque e duas placas de 120 mm nas posições centrais, a disposição C1, ou quatro placas de 120 mm próximas dos cantos e 2 placas de 80 mm nas posições centrais.

3.3.3.1 Ensaio com a disposição de placas C1

Com a disposição de placas C1 procurou-se eliminar as zonas sem agitação presentes na disposição A, mas mantendo a agitação nos cantos do tanque. Foram utilizadas as placas de 80 mm nos cantos do tanque, pois pelo observado na disposição A seriam suficientes para agitar essa zona. As placas de 120 mm foram colocadas na zona central, pois verificou-se que essa zona era a menos agitada, quando foi utilizada a disposição A.

Tabela 3.6: Resultados dos testes com a disposição de placas C1

Teste #	T Mistura (min)	Dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
65	60	2 LV	Torneira	0,1	2	73±2,0	0,32±0,05
66	30	2 LV	Torneira	0,1	2	73±1,8	0,24±0,07
68	30	2 LV	Destilada	0,1	2	88±2,0	0,31±0,05

LV - Line Vac

Comparando o teste 68 (Tabela 3.6) com o teste 63 (Tabela 3.5) é possível verificar que a utilização da disposição de placas C1 permitiu um ligeiro aumento da viscosidade da solução,

com 88 s/quart contra 87 s/quart, e verificou-se um aumento mais significativo na homogeneidade, com o desvio padrão a diminuir de 0,59 mL/s para 0,31 mL/s. A homogeneidade ficou bastante perto do objetivo. Esta melhoria na homogeneidade indica que existem menos zonas sem agitação, permitindo assim uma melhor hidratação de todo o polímero.

Na Tabela 3.6 são apresentados os resultados dos primeiros testes realizados com água da torneira. Comparando os testes 66 e 68 pode-se verificar que a viscosidade da solução é bastante menor no teste 66, com 73 s/quart contra os 88 s/quart obtidos no teste 68, que utiliza os mesmos parâmetros do sistema Pulsair, mas com água destilada. A viscosidade é 15 s/quart inferior para a solução com água da torneira. Observa-se também que, embora a viscosidade seja inferior, a homogeneidade não é afetada pela utilização de água da torneira e neste caso até é superior à homogeneidade conseguida com água destilada, com um desvio padrão de 0,24 mL/s contra 0,31 mL/s. Considerando a homogeneidade conseguida, a combinação da disposição de placas C1 com a utilização de dois LineVac's parece ser eficaz na dispersão do polímero. Tendo em conta a diferença de viscosidade que existe entre as soluções com água destilada e as soluções com água da torneira, compreende-se que é necessário aumentar a capacidade de hidratar completamente todo o polímero, de modo a fazer face à perda de viscosidade causada pela água da torneira.

Foi também realizado um teste com mistura da solução durante 60 minutos, para compreender como o tempo de mistura pode afetar a viscosidade e homogeneidade da solução. Os valores obtidos são bastante próximos entre o teste a 60 minutos e o teste a 30 minutos, o que indica não existir muita influência do tempo de mistura na viscosidade e homogeneidade da solução.

3.3.3.2 Ensaio com a disposição de placas C2

A disposição de placas C2 foi proposta com o objetivo de conseguir aumentar a capacidade de hidratação do polímero, através da utilização de quatro placas de 120 mm, no lugar das placas de 80 mm utilizadas na C1, e duas placas de 80 mm na posição central.

Todos os parâmetros do sistema Pulsair foram os definidos nos testes de otimização da pressão (3.3.1.2), exceto o Toff. Foram utilizados três valores de Toff, Toff=2s, o valor já utilizado nos testes anteriores, Toff=1s e Toff=3s.

Tabela 3.7: Resultados dos testes com a disposição de placas C2

Teste #	Tempo de Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
71	30	2 LV	Destilada	0,1	2	88±1,9	0,23±0,11
79	30	2 LV	Torneira	0,1	2	76±2,0	0,23±0,10
80	60	2 LV	Torneira	0,1	2	75±2,0	0,40±0,10

81	60	2 LV	Destilada	0,1	2	88±2,0	0,27±0,10
82	120	2 LV	Destilada	0,1	2	86±2,0	0,42±0,10

LV - Line Vac

3.3.3.2.1 Estudo do efeito da disposição das placas acumuladoras (Comparação entre disposição C1 e C2)

Para comparar os resultados obtidos com a disposição C1 com os resultados da disposição C2, é necessário consultar a Tabela 3.6, com os resultados obtidos para a disposição C1, e a Tabela 3.7, com os resultados para a disposição C2.

Para analisar a eficácia da disposição de placas C2 em relação à disposição C1, podemos comparar os resultados do teste 71 com os resultados do teste 68 e os resultados do teste 79 com os resultados do teste 66. Os testes 71 e 68 foram realizados nas mesmas condições, expeto a disposição das placas, e pode-se verificar que não houve variação na viscosidade, com um valor de 88 s/quart para ambos os testes. A homogeneidade melhorou, com o desvio padrão a diminuir de 0,31 mL/s no teste 68 para 0,23 mL/s no teste 71, e o objetivo de homogeneidade passou a ser cumprido. Nos testes com água da torneira (testes 79 e 66), verificou-se um pequeno aumento da viscosidade no teste 79, atingindo-se 76 s/quart contra os 73 s/quart obtidos no teste 66. Houve também uma pequena melhoria na homogeneidade, que pode ser considerada desprezável, com o desvio padrão a diminuir de 0,24 mL/s no teste 66 para 0,23 mL/s no teste 79.

Esta primeira comparação entre as disposições a C1 e C2 indica que o aumento na capacidade de hidratação com a disposição C2 não foi significativo, pois a diferença de viscosidade é pequena.

3.3.3.2.2 Estudo do efeito do Toff na mistura

Para o estudo do efeito do Toff foram utilizados, tal como já foi referido, três valores de Toff, Toff=2s, Toff=1s e Toff=3s. Com utilização de um Toff=1s pretendia-se avaliar se uma maior proximidade entre pulsos de ar, o que resulta numa agitação mais intensa da solução, teria um efeito positivo na viscosidade e homogeneidade da solução. Com um Toff=3s procurou-se compreender qual o efeito de um maior espaçamento entre pulsos de ar. Um maior espaçamento entre pulsos de ar permite não perturbar o movimento convectivo criado pelas bolhas de ar a cada pulso.

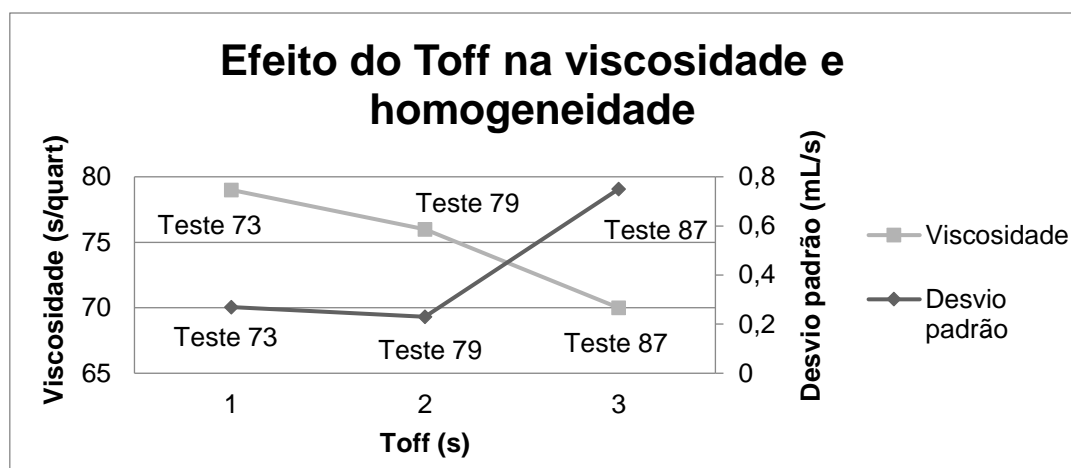
Tabela 3.8: Testes com disposição de placas C2 para estudo do efeito do Toff

Teste #	Tempo de Mistura (min)	Tipo de dispersão	Água	Ton (s)	Toff (s)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
73	30	2 LV	Torneira	0,1	1	79±2,0	0,27±0,10
84	30	2 LV	Destilada	0,1	3	83±2,4	0,50±0,05

87	30	2 LV	Torneira	0,1	3	70±0,8	0,75±0,16
LV - Line Vac							

Para a comparação do efeito de diferentes Toff, foram realizados três testes com água da torneira, o teste 73, com Toff=1s, o teste 79, com Toff=2 s e o teste 87, com Toff= 3s. Todos os outros parâmetros foram fixos. Os resultados destes testes são apresentados na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8, e são comparados no gráfico da Figura 3.9.

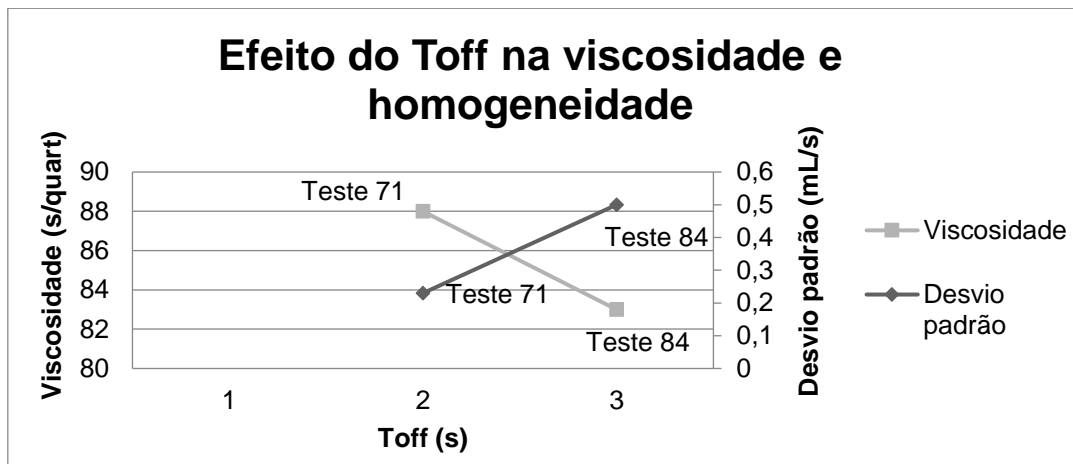
Figura 3.9: Gráfico da variação da viscosidade e desvio padrão, para uma solução misturada com água da torneira, de acordo com a variação de Toff



No gráfico apresentado na Figura 3.9, pode-se verificar que o teste 73, com Toff=1s, apresentou a maior viscosidade de entre todos os testes realizados com água da torneira, com um valor de 79 s/quart, mas é apenas 3 s/quart superior à viscosidade obtida no teste 79, com Toff=2s, enquanto que a homogeneidade é ligeiramente inferior, com um desvio padrão de 0,27 mL/s contra 0,23 mL/s. Os resultados obtidos no teste com Toff=1s não são muitos confiáveis, pois este teste apenas foi executado uma vez. Já para o teste 87, realizado com Toff=3 s, obteve-se uma viscosidade de 70 s/quart, um valor 6 s/quart inferior ao conseguido com Toff=2, enquanto que para a homogeneidade a diminuição ainda é maior, com um aumento do desvio padrão de 0,23 mL/s para 0,75 mL/s. A menor viscosidade e homogeneidade obtidas nos testes com Toff= 3s levantam a hipótese de que um Toff=3s resulta na pior capacidade de hidratação e dispersão do polímero.

Nos testes realizados com água destilada apenas foram comparados Toff=2s e Toff=3s, os teste 71 e 84, respetivamente. Os resultados destes testes são apresentados na Tabela 3.7 e Tabela 3.8, e são comparados no gráfico da Figura 3.10. Verifica-se que os resultados obtidos com Toff=3s apresentam a viscosidade e homogeneidade mais baixas para disposição de placas C2, para soluções com água destilada. A viscosidade conseguida no teste 84 tem um valor de 83 s/quart, inferior aos 88 s/quart obtidos no teste 71. Também a homogeneidade diminuiu no teste 84, com um desvio padrão de 0,5 mL/s contra os 0,23 mL/s conseguidos no teste 71.

Figura 3.10: Gráfico da variação da viscosidade e desvio padrão, para uma solução misturada com água destilada, de acordo com a variação de Toff



Os resultados obtidos para os testes com água destilada estão de acordo com os obtidos para a água da torneira, com uma diminuição tanto da viscosidade como da homogeneidade nos testes com Toff=3s. Estes resultados sustentam a hipótese de que um Toff=3s resulta numa dispersão e hidratação do polímero menos eficaz do que um Toff=2s.

3.3.3.2.3 Resumo da seção

Nos testes realizados com a disposição C2 também foram experimentados diferentes tempos de mistura. Os resultados dos testes realizados para tempos de mistura diferentes indicam que existe uma solução totalmente desenvolvida ao fim de 30 minutos, pois as diferenças de viscosidade e homogeneidade para os vários tempos de mistura são pequenas.

A disposição de placas C2 revelou-se a mais eficaz, sendo a que permitiu obter maior viscosidade e homogeneidade da solução polimérica, com 88 s/quart e 0,23 mL/s para água destilada e 76 s/quart e 0,23 mL/s para água da torneira. Ainda assim o objetivo relativo à viscosidade não foi cumprido, com a viscosidade obtida a ficar 14 s/quart para a água da torneira, como tal o sistema ainda precisa de ser melhorado. Existem algumas hipóteses a testar, a repetição do teste com Toff=1s, para procurar compreender se um Toff=1s é realmente mais eficaz, a substituição das placas centrais de 80 mm por placas de 120 mm, para tentar aumentar a agitação na zona central do tanque e também a alimentação separada de cada placa ou de grupos de placas, em vez da alimentar todas as placas com o mesmo reservatório, com o objetivo de evitar os problemas de alimentação de ar apresentados na seção 3.3.1.1.

3.4 Protocolo experimental de mistura de solução de PolyGEO em tanque retangular, utilizando a disposição de placa C2

3.4.1 Comparação com os resultados dos testes em escala reduzida e estudo do efeito do tempo de mistura

No primeiro teste realizado no tanque retangular foram utilizados os parâmetros do teste 79, o melhor resultado conseguido para uma solução com água da torneira no tanque à escala (com $T_{Off}=2s$). Para adaptar esses parâmetros a uma escala maior foram utilizadas placas de maior diâmetro, com 400 mm e 360 mm, em vez das placas de 120 mm e 80 mm utilizadas no teste 79, foram também utilizados tubos de alimentação com diâmetros interno de 12 mm e vez dos de 6,5 mm utilizados no teste 79. O scale-up dos parâmetros foi realizado relacionando o R Pulse com a dimensão do tanque.

Tabela 3.9: Testes no tanque retangular com parâmetros de scale-up, LV - Line Vac

Teste #	T Mistura (min)	Modo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
37	30	2 LV	0,1	2	6	12	81±2,0	1,01±0,10
38	60	2 LV	0,1	2	6	12	72±2,0	0,39±0,05

LV - Line Vac

Na Tabela 3.9 são apresentados os resultados dos testes realizados com os parâmetros definidos a partir do teste 79. Comparando o teste 37 com o teste 79 (Tabela 3.7), verifica-se que com o aumento de escala não existe diminuição da viscosidade, com 80,75 s/quart no teste 37, contra os 76 s/quart conseguidos no teste 79. A homogeneidade conseguida no teste 37 diminuiu bastante em relação ao teste 79, e está bastante longe do objetivo, com um aumento do desvio padrão de 0,23 mL/s para 1,01 mL/s. A viscosidade conseguida no teste 37, apesar de mais elevada que no teste 79, parecer dever-se à presença de aglomerados de polímero (Figura 3.11). Os aglomerados quando presentes em alguma das amostras recolhidas, resultam em valores de viscosidade mais elevados para essa amostras, aumentando a média da viscosidade, mas diminuindo a homogeneidade.

Figura 3.11: Acumulação de aglomerados de polímero no fundo tanque (assinalados pelo círculo)



Na comparação entre os testes 37 e 38, com um tempo de mistura de 60 minutos, verifica-se uma diminuição da viscosidade, de 81 s/quart para 72 s/quart. No entanto houve um aumento significativo da homogeneidade, com a diminuição do desvio padrão do tempo de escoamento de 1,01 mL/s para 0,39 mL/s, um valor já próximo do objetivo. O aumento da homogeneidade e diminuição da viscosidade parecem estar ligados, neste caso em particular, pois numa solução mais homogênea existem menos aglomerados de polímero. A presença de aglomerados pode resultar em amostras com viscosidades mais elevadas, elevando assim a média da viscosidade, mas diminuindo a homogeneidade. Por outro lado a existência de aglomerados significa que nem todo o polímero está completamente hidratada, o que resulta numa menor viscosidade da solução. Esta comparação entre os tempos de mistura indica que, para as condições utilizadas, a solução polimérica não se encontrar totalmente desenvolvida ao fim de 30 minutos, com a homogeneidade a melhorar para o tempo de mistura de 60 minutos, indicando uma melhor hidratação do polímero.

Uma vez que no teste 37 a homogeneidade está muito longe do objetivo é necessário encontrar soluções, o primeiro parâmetro que foi estudado foi o modo de dispersão do polímero.

3.4.2 Otimização do modo de dispersão do polímero

Nos testes 37 e 38 a dispersão do polímero foi feita com os Line Vac's utilizados nos testes do tanque à escala, no teste 39 foi utilizado um Line Vac de maiores dimensões, com o objetivo de melhorar a homogeneidade, através de uma melhor a dispersão do polímero. O Line Vac mais pequeno utiliza um tubo de aspiração com diâmetro interno de 10 mm e um tubo de alimentação de ar com diâmetro de 4 mm, o Line Vac maior utiliza um tubo de aspiração com diâmetro de 1" e tubo de alimentação de ar com 6,5 mm de diâmetro, os dois Line Vac diferentes são apresentados na Figura 3.12. Todos os outro parâmetros foram fixos.

Figura 3.12: Comparação entre o Line Vac de diâmetro de 1" (à esquerda) e o Line Vac de diâmetro de 10 mm (à direita)



Tabela 3.10: Resultados dos testes para a otimização da dispersão do polímero

Teste #	Modo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
37	2 LV	0,1	2	6	12	81±2,0	1,01±0,10
39	2 LV Grande	0,1	2	6	12	75±2,0	0,61±0,05

LV - Line Vac

Na Tabela 3.10 são apresentados os resultados para os testes com Line Vac's de diferentes dimensões. Comparando o teste 37 com o teste 39 verifica-se existe uma melhoria na homogeneidade, com o desvio padrão a diminuir de 1,01 mL/s para 0,61 mL/s. A viscosidade diminui de 81 s/quart para 75 s/quart, o que pode estar relacionado com menor quantidade de aglomerados. A menor quantidade de aglomerados resulta numa maior homogeneidade, mas significa que não existem amostras com viscosidade mais elevada, resultante da presença de aglomerados, que possam elevar a média da viscosidade. Os resultados do teste 39 (Tabela 3.9) foram mais próximos dos conseguidos no teste 79, particularmente a viscosidade, que foi

apenas 1 s/quart superior no teste 79. A diferença na homogeneidade foi mais significativa, com um desvio padrão de 0,61 mL/s no teste 39 contra os 0,23 mL/s obtidos no teste 79.

Os resultados obtidos nos testes 37 e 39 indicam que a utilização de Line Vac's de maior dimensão se adequa melhor à dispersão da quantidade de polímero utilizada, 500 g para cada um dos Line Vac, permitindo assim obter maior homogeneidade. No teste 37, onde foi utilizado o Line Vac de menor dimensão verificou-se a formação de "fisheyes", uma possível causa para a menor homogeneidade conseguida.

3.4.3 Estudo do efeito do Ton

Foi considerada a hipótese de que a baixa homogeneidade conseguida nos testes 37 e 39 se deveria a agitação insuficiente da solução. De forma a aumentar a agitação foi proposto aumentar o volume de ar fornecido às placas acumuladoras, de modo a aumentar o volume das bolhas formadas. Para aumentar o volume de ar fornecido foi testado um TOn=0,3s, que resulta num volume ligeiramente inferior a três vezes o volume fornecido com um TOn=0,1s, pois com maior tempo de abertura da válvula há uma redução da pressão disponível e consequentemente uma diminuição do caudal. Nestes testes foram comparado esses dois valores de TOn, todos os outros parâmetros foram fixos.

Tabela 3.11: Resultados dos testes de comparação de TOn

Teste #	Modo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
39	2 LV Grande	0,1	2	6	12	75±2,0	0,61±0,05
92	2 LV Grande	0,3	2	6	12	74±2,0	0,29±0,05

LV - Line Vac

Na Tabela 3.11 pode-se verificar que existe uma melhoria significativa da homogeneidade no teste 92, com o desvio padrão a descer de 0,61 mL/s, no teste 39, para 0,29 mL/s, com o objetivo no que toca à homogeneidade a ser cumprido no teste 39. Em relação à viscosidade não houve variação com 75 s/quart em ambos os testes.

Os resultados do teste 92 indicam que utilização de um TOn=0,3s permite, para as dimensões do tanque e sistema Pulsair utilizados, obter uma solução homogénea. O fato de o valor da viscosidade não estar dentro do objetivo indica que os parâmetros utilizados não permitem a hidratação completa de todo o polímero, hipótese que é sustentada pela existência de aglomerados nos cantos do tanque.

3.4.4 Estudo do efeito do modo de alimentação das placas acumuladoras

Outra proposta para tentar aumentar a viscosidade e homogeneidade, aumentando a agitação da solução, foi a alimentação separada de conjuntos de placas em momentos diferentes. Ao

alimentar conjuntos de placas em momentos diferentes o caudal de ar fornecido a cada placa é mais elevado, resultando em bolhas de maior dimensão e em maior agitação da solução. Neste caso as placas foram separadas em dois conjuntos, cada um alimentado por uma válvula. Um dos conjuntos é formado pelas quatro placas de 400 mm e o outro pelas placas centrais de 360 mm.

Tabela 3.12: Testes de comparação do modo de alimentação das placas acumuladoras

Teste #	Modo de dispersão	Ton (s)	Toff (s)	Pressão (bar)	D tubo (mm)	Viscosidade (s/quart)	Desvio Padrão (mL/s)
92	2 LV Grande	0,3	2	6	12	75±2,0	0,29±0,05
93	2 LV Grande	0,3	2	6	12	77±2,0	0,73±0,05

LV - Line Vac

Na Tabela 3.12 pode-se comparar os resultados dos testes 92 e 93 e verifica-se que existe uma diminuição da homogeneidade no teste 93, com o desvio padrão a aumentar de 0,29 mL/s para 0,73 mL/s. Com a diminuição da homogeneidade verifica-se novamente um ligeiro aumento da viscosidade, que aumentou de 75 s/quart, no teste 92, para 77 s/quart.

Uma hipótese para diminuição da homogeneidade é o aumento do tempo sem agitação em cada zona do tanque. A alimentação alternada dos conjuntos de placas resulta numa maior agitação em cada zona coberta por esses conjuntos, no entanto também implica um período de 4s entre os pulsos de um determinado conjunto, o que pode potenciar a acumulação de polímero e a formação de aglomerados, sendo acumulação acontece sobretudo nos cantos do tanque.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na seção 3.2 levam a concluir que é possível simular a agitação criada por uma bolha de ar em ascensão num líquido, através de análise CFD, recorrendo ao modelo multifase *Volume of Fluid* em conjunto com o modelo de turbulência *k-epsilon standard*. A validação dos resultados da análise CFD com o caso real foi realizada através da comparação da velocidade de ascensão da bolha, o único parâmetro que foi possível determinar eficazmente de forma experimental. O erro da velocidade determinada na análise CFD relativamente à velocidade determinada experimentalmente foi de apenas 4,3%. A análise da agitação criada por uma bolha de ar em ascensão é relevante, pois este é o princípio de funcionamento do sistema Pulsair. A proximidade entre resultados computacionais e experimentais leva a crer que é possível prever a eficácia de um sistema Pulsair, por exemplo para a identificação de zonas sem agitação, recorrendo à análise CFD.

Os resultados obtidos na seção 3.3 levam a concluir, tendo em conta a variedade de parâmetros do sistema modificados e testados, que existe alguma dificuldade em obter, num tanque retangular, uma solução de PolyGEO com uma viscosidade de 90 s/quart utilizando água da torneira. Nos testes realizados com água destilada a viscosidade obtida ficou mais próxima do objetivo.

A comparação entre os melhores resultados obtidos para cada disposição de placas leva a concluir que a disposição de placas tem pouca influência na viscosidade da solução. A disposição A foi a que resultou numa viscosidade mais baixa, 83 s/quart no teste 57, mas esse valor é apenas 5 s/quart menor do que o conseguido no teste 71, onde se conseguiu 88 s/quart com a disposição C2. A viscosidade obtida com a disposição C1 é igual à conseguida na C2 e o valor da viscosidade utilizando a disposição é apenas 1 s/quart inferior. A disposição das placas parece ter maior influência na homogeneidade da solução, hipótese sustentada pela variação desvio padrão do tempo de escoamento, que diminui de 0,59 mL/s no teste 60, que utiliza a disposição B, para 0,23 mL/s no teste 71, com a disposição C2.

A comparação de diferentes TOff's permite concluir que utilizar um valor de TOff maior que 2s resulta numa redução da viscosidade e homogeneidade da solução. A proximidade entre os resultados do teste 73, com Toff=1s, e do teste 79, com Toff=2s, deixa dúvidas quanto a influência do TOff para valores entre 1s e 2s.

Os testes apresentados na seção 3.3 também permitem concluir que o modo de dispersão do polímero na água tem grande influência na viscosidade e homogeneidade da solução obtida, essa conclusão pode ser retirada através da comparação entre os testes 50 e 57, onde existe um aumento da viscosidade de 72 s/quart para 83 s/quart, embora se verifique uma redução da homogeneidade, com o desvio padrão do caudal de escoamento a aumentar de 0,16 mL/ para 0,5 mL/s.

Apesar de o objetivo não ter sido atingido, é possível concluir que a disposição de placas C2 permitiu alcançar os melhores resultados. O melhor resultado obtido com essa disposição utilizando água destilada foi o teste 71, com uma viscosidade de 88 s/quart e uma homogeneidade de 0,23 mL/s. Os melhores resultados obtidos com água da torneira foram o teste 79, com uma viscosidade de 76 s/quart e homogeneidade de 0,23 mL/s, para um TOff=2s, e o teste 73, com uma viscosidade de 79 s/quart e homogeneidade de 0,27 mL/s, para um TOff=1s. Verifica-se que a viscosidade obtida no teste 71 é 9 s/quart superior à conseguida no teste 79.

Nos testes realizados do tanque retangular de scale up, apresentados na seção 3.4, também não foi possível cumprir o objetivo de viscosidade, mas foi possível concluir que os critérios utilizados para o scale up permitiram prever a condições de mistura para esse tanque e obter uma solução com viscosidade e homogeneidade com valores próximos dos obtidos para os testes em tanque à escala. Comparando o teste 79 e o teste 92, realizados utilizando parâmetros equivalentes, mas adaptados a uma escala maior para o teste 92, verifica-se que a viscosidade apenas diminui de 76 s/quart, no teste 79, para 75 s/quart, no teste 92. A homogeneidade também diminuiu ligeiramente, com o desvio padrão do caudal de escoamento a aumentar de 0,23 mL/s para 0,29 mL/s. O teste 79 foi realizado utilizando placas acumuladoras de 120 mm e de 80 mm, pressão 6 bar, tubos de 6,5 mm de diâmetro, Toff=2 s e TOn=0,1 s, no teste 92 foram utilizados parâmetros de scale-up, com placas de 400 mm e 360 mm, pressão de 6 bar, tubos de 12 mm, TOff=2 s e TOn=0,3 s.

Como perspectivas futuras seria importante desenvolver uma análise CFD do sistema Pulsair que tivesse em conta todos os efeitos desse sistema, e não apenas das bolhas de ar em ascensão. Seria interessante também determinar experimentalmente campos velocidades de escoamento que se verificam durante a agitação da solução, para comparação com a análise CFD. Um método válido para a determinação desses campos de velocidade é o Particle Image Velocimetry (PIV). A combinação entre uma análise CFD mais próxima da realidade e o conhecimento dos campos de velocidade obtidos durante agitação poderá permitir prever as melhores condições para a mistura da solução polimérica, por exemplo para determinação do TOff conhecendo o tempo que o fluido demora até voltar ao repouso, e também realizar um scale up do sistema. Seria também importante eliminar a acumulação de polímero que ocorre nos cantos do tanque, aumentando a agitação nessa zona, através da melhoria do sistema Pulsair, ou eliminando os ângulos retos existentes na ligação entre as paredes e o fundo do tanque, de modo a evitar a diminuição da velocidade do fluido.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Trindade, *Uso de Polímero como Substituto da Bentonite na Estabilização de Escavações em Solos*, 2010.
- [2] T. A. Jones, "POLYMER HYDRATION METHOD USING MICROEMULSIONS". Patente US 7,407,915 B2, 2008.
- [3] E. Mano, em *Introdução a Polímeros*, 1999, pp. 1-9.
- [4] W. Carothers, "Polymerization," 1931.
- [5] P. Flory, *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, 1953.
- [6] R. Ebewele, *POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2000.
- [7] B. I. Khalil, "Introduction of Polymers".
- [8] "Polímeros e Materiais Poliméricos," [Online]. Available: <http://educa.fc.up.pt/ficheiros/noticias/69/documentos/108/Manual%20Pol%20A1meros%20e%20Materiais%20polimericos%20NV.pdf>.
- [9] "Polymer Chemistry - Polymerization Reactions," 11 Julho 2000. [Online]. Available: <http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm>. [Acesso em 30 Março 2017].
- [10] L. Baekeland, "Method of making insoluble products of fenol and formaldehyde". Patente US942699, 1909.
- [11] H. Staudinger, *Macromolecular chemistry*, 1953.
- [12] F. Billmeyer Jr., *Textbook of polymer science*, John Wiley & Sons, 1984.
- [13] R. Mulhaupt, "Hermann Staudinger and the Origin of Macromolecular Chemistry," 2004.
- [14] W. Carothers, "STUDIES ON POLYMERIZATION AND RING FORMATION. I. AN INTRODUCTION TO THE GENERAL THEORY OF CONDENSATION POLYMERS," 1929.
- [15] "Polymer Chemistry - Topology," 21 Julho 2000. [Online]. Available: <http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Topology.htm>. [Acesso em 30 Março 2017].
- [16] P. Anadão, "Polymer/ Clay Nanocomposites: Concepts, Researches, Applications and Trends for The Future," 2012.
- [17] "Polymers: an overview," [Online]. Available: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polymers-an-overview.html>. [Acesso em 23 Março 2017].
- [18] V. G. Kadajji, "Water Soluble Polymers for Pharmaceutical Applications," 2011.
- [19] E. R. Kolodny, "POLYACRYLAMIDE PREPARATION". Patente 3,002,960, 1961.
- [20] D. B. Gershberg, "HIGH MOLECULAR WEIGHT ACRYLAMIDE POLYMER PRODUCTION BY HIGH SOLIDS SOLUTION POLYMERIZATION". Patente 3,929,751,

1975.

- [21] C. A. DeFazio, "PREPARATION OF HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYACRYLATES BY INVERSE EMULSION POLYMERIZATION". Patente 4,656,222, 1987.
- [22] R. E. Neff, "Methods of making and using high molecular weight acrylamide polymers". Patente US5530069 A, 1996.
- [23] D. Hunkeler, "Synthesis and Characterization of High Molecular Weight Water- Soluble Polymers," 1991.
- [24] SNF Floerger, "Water Soluble Polymer".
- [25] C. L. McCormick, "Structural Design of Water-Soluble Copolymers," 1991.
- [26] C. L. McCormick, "Encyclopedia of Polymer Science and Technology (Water-Soluble Polymers)," 2002.
- [27] P. Ghosh, "FUNDAMENTALS OF POLYMER SCIENCE," 2006.
- [28] S.King, "Chapter 3 Introduction to Organic Molecules and Functional Groups".
- [29] "Functional groups are groups of molecules attached to organic molecules and give them specific identities or functions.," [Online]. Available:
<https://www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/the-chemical-foundation-of-life-2/carbon-52/organic-molecules-and-functional-groups-292-11425/>.
[Acesso em 15 Março 2017].
- [30] H. R. Dittmar, "POLYMERIZATION OF WATER SOLUBLE POLYMERS," 1942.
- [31] P. A. Small, "SOME FACTORS AFFECTING THE SOLUBILITY OF POLYMERS," 1953.
- [32] E. H. deBUTTS, "Rheology of Sodium Carboxymethylcellulose Solutions," 1957.
- [33] N.Adams, "The Rheological Properties of Concentrated Polymer Solutions," 1958.
- [34] K. Halake, "Recent application developments of water-soluble synthetic polymers," 2013.
- [35] M. O. Ogedengbe, "Polyelectrolytes in the treatment of wastewaters," 1972.
- [36] M. E. Goldblatt, "New Polyelectrolyte Emulsion Breaker Improves Oily Wastewater Cleanup at Lower Usage Rates," 2014.
- [37] I. Pinheiro, "PERFORMANCE OF CATIONIC POLYACRYLAMIDES IN PAPERMAKING- FLOCCULATION, DRAINAGE AND RETENTION," 2011.
- [38] Y. Wang, "Polymers used in papermaking industry process," 2014.
- [39] R. Caenn, "Drilling fluids: State of the art," 1995.
- [40] Baker Hughes, "Drilling Fluids Reference Manual," 2006.
- [41] W. J. Orts, "Use of Synthetic Polymers and Biopolymers for Soil Stabilization in Agricultural, Construction, and Military Applications," 2007.
- [42] B. NARASIMHAN, "Molecular Analysis of Drug Delivery Systems Controlled by Dissolution of the Polymer Carrier," 1996.

- [43] V. G. Constien, "METHOD OF HYDRATING OIL BASED FRACTURING CONCENTRATE AND CONTINUOUS FRACTURING PROCESS USING SAME". Patente 4,828,034, 1989.
- [44] M. Hashmet, "Empirical Correlations for Viscosity of Polyacrylamide Solutions with the Effects of Concentration, Molecular Weight and Degree of Hydrolysis of Polymer," 2014.
- [45] D. R. Anderson, "Process for rapidly dissolving water-soluble polymers," 1971.
- [46] E. T. Sortwell, "Method of dispersing dry, water-soluble polymers in water," 1986.
- [47] J. Strack, *Advanced Polymer Mixing for Improved Dewatering*, 2015.
- [48] Y. Kim, *Understanding Fluid Mechanics and Chemistry in Advanced Polymer Mixing for Improved Coagulation and Dewatering*.
- [49] S. Blair, *RHEOLOGY: A BRIEF HISTORICAL SURVEY*, 1969.
- [50] M. F. L. Gotschlich, "Escoamento de fluidos não-newtonianos: revisão da literatura e correlações para o fator de atrito e coeficientes de perda localizada," 2011.
- [51] R. Chhabra, *Non-Newtonian flow and applied rheology*, 2008.
- [52] S. Richardson, "NON-NEWTONIAN FLUIDS," 2011.
- [53] A. Kreiba, "The Rheological Properties of Aqueous Polyacrylamide Solutions," 2000.
- [54] N. Pal, "Surface Tension, Dynamic Light Scattering and Rheological studies of a new Polymeric Surfactant for application in enhanced oil recovery," 2016.
- [55] O. Nwosu, "Rheological Behaviour of Eco-friendly Drilling Fluids from Biopolymers," 2014.
- [56] D. Glitto, "Polymer Performance: Design Considerations for Liquid Polymer Feed and Control Systems," [Online]. Available: <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-30/issue-5/editorial-features/polymer-performance-design-considerations-for-liquid-polymer-feed-and-control-systems.html>. [Acesso em 13 Março 2017].
- [57] L. J. Andermann, "PROCESS FOR IMPROVING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF AN AQUEOUS DISPERSION". Patente US 2014/0080945 A1, 2014.
- [58] S. B. Grassino, 2000. [Online]. Available: <http://pslc.ws/macrog/property/solpol/ps3.htm>. [Acesso em 07 Março 2017].
- [59] M. Mohammed, "Effect of Type and Concentration of Different Water Soluble Polymer Solutions on Rheological Properties," 2009.
- [60] N. Adams, "Rheological Properties of concentrated polymer solutions - A cone-and-plate and parallel-plate pressure distribution apparatus for determining normal stress differences in steady shear flow," 1964.
- [61] A. H. ABDEL-ALIM, "The Rheological Properties of Concentrated Polymer Solutions I. Degradation of Polyacrylamide in a High-Shear Couette Viscometer," 1973.
- [62] G. Leblanc, "Viscosity Measurement," 1999.
- [63] M. Rahman, "Design, Construction & Performance Test of a Rotational Digital

viscometer,” 2014.

- [64] A. Akpek, “A Study on Vibrational Viscometers Considering Temperature Distribution Effect,” 2014.
- [65] P. Yuan, “Measurement of Viscosity in a Vertical Falling Ball Viscometer,” 2008.
- [66] H. N. MARSH, “Properties and Treatment of Rotary Mud,” 1930.
- [67] American Petroleum Institute, *API RP 13B-1*, 2003.
- [68] “Marsh funnel viscometer,” [Online]. Available: <http://www.controls-group.com/eng/cement-testing-equipment/marsh-funnel-viscometer-.php>. [Acesso em 24 Março 2017].
- [69] [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/291351798_fig1_Figure-1-Standardized-geometry-of-the-Marsh-funnel-according-to-API-13B-and-DIN-4127>. [Acesso em 17 Março 2017].
 - [94] G. A. Alireza, "Mixing system employing a dispersion tank with venturi input for dissolving water soluble additives into irrigation water". Patente US005580168A, 1996.
 - [95] D. V. S. Gupta, "POLYMER HYDRATION METHOD," 2013.
 - [96] Pulsair Systems. Inc, *HOW PULSAIR BUBBLE POWER WORKS TO MIX TANK CONTENTS*.
 - [97] E. L. Paul, *HANDBOOK OF INDUSTRIAL MIXING*, John Wiley & Sons, 2004.
 - [98] "Anchor - Philadelphia Mixing Solutions," [Online]. Available: <https://www.philamixers.com/products/impellers/low-reynolds-number-impellers/anchor/>. [Acesso em 08 Março 2017].
 - [99] "Radial Flow Impeller Technology - Philadelphia Mixing Solutions," [Online]. Available: <https://www.philamixers.com/capabilities/impeller-technology/radial-flow-impellers/>. [Acesso em 8 Março 2017].
 - [100] "Mixing in Chemical Reactors," [Online]. Available: <http://www.umich.edu/~elements/01chap/html/reactors/mixing/impeller.htm>. [Acesso em 8 Março 2017].
 - [101] "Axial Flow Impellers - Philadelphia Mixing Solutions," [Online]. Available: <https://www.philamixers.com/capabilities/impeller-technology/axial-flow-impellers/>. [Acesso em 8 Março 2017].
 - [102] M. Shah, *Process Engineering: Agitation & Mixing*.
 - [103] Inoxpa, "Agitators for Standard Tanks," [Online]. Available: http://www.inoxpa.com/uploads/document/Fitxes%20t%C3%A8cniques/Components/Me scla/Agitators/FA.Ag.1_EN.pdf. [Acesso em 03 Abril 2017].

- [104] "NOV - Double Helical Ribbon Impeller," [Online]. Available: http://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Process_and_Flow_Technologies/Industrial_Technologies/Products/Impellers/Double_Helical_Ribbon_Impeller/Double_Helical_Ribbon_Impeller.aspx. [Acesso em 17 Março 2017].
- [105] INDCO, [Online]. Available: <https://www.indco.com/ten-inch-four-blade-axial-flow-turbine-mill-finish>. [Acesso em 17 Março 2017].
- [106] "Rushton (RT) Radial Flow Disk Blade Turbine - Philadelphia Mixing Solutions," [Online]. Available: <https://www.philamixers.com/products/impellers/radial-flow-impellers/radialflow-rushton/>. [Acesso em 17 Março 2017].
- [107] L. E. Samler, "BLENDING METHOD AND APPARATUS". Patente 2,718,471, 1955.
- [108] L. B. V. MUNSTER, "METHOD OF MIXING MATERIALS AND A PNEUMATIC MIXING DEVICE ADAPTED TO SAID METHOD". Patente 3,159,383, 1964.
- [109] G. Grün, "APPARATUS FOR TREATMENT OF POWDERED AND GRANULAR MATERIAL". Patente 3,179,379, 1965.
- [110] W. F. Rothermel, "AUTOMATIC METHOD AND APPARATUS FOR OBTAINING DIFFERENT DILUTIONS FROM BLOOD OR THE LIKE SAMPLES AND PROCESSING THE SAME BY FLUID HANDLING AND ELECTRONICS TO OBTAIN CERTAIN NONELECTRIC PARAMETERS". 1970.
- [111] W. F. Rothermel, "LIQUID MIXING AND TRANSFER APPARATUS AND METHOD". 1971.
- [112] P. P. Cabrera, "METHOD AND APPARATUS FOR REGULATING THE SIZE AND FREQUENCY OF BUBBLES EMPLOYED FOR MIXING LIQUIDS". Patente 4,136,970, 1979.
- [113] S. GONDO, "Liquid mixing by large gas bubbles in bubble columns," 1972.
- [114] R. J. Koopmans, "MIXER FOR USE IN WASTEWATER TREATMENT PROCESSES". Patente US 7,374,675 B2, 2008.
- [115] R. E. Parks, "METHOD AND APPARATUS FOR GAS INDUCED MIXING AND BLENDING". Patente 4,595,296, 1986.
- [116] R. E. Parks, "METHOD AND APPARATUS FOR GAS INDUCED MIXING AND BLENDING OF FLUIDS AND OTHER MATERIALS". Patente US 6,629,773 B2, 2003.
- [117] Innovative Technology Summary Reports, "Pulsed-Air Mixer Tanks Focus Area," 1999.
- [118] "Homogenising fluids with compressed gas," *Tank Storage Magazine*, 2014.
- [119] J. O. Browne, "Method for Mixing Slurry". Patente US 7,387,428 B1, 2008.
- [120] "Effective air bubbles," [Online]. Available: <http://cpp.industrie.de/allgemein/effective-air-bubbles/>. [Acesso em 23 Março 2017].
- [121] R. G. Galdamez, "Numerical Simulations of Pulsed-Air Mixing Technology using Multiphase Computational Fluid Dynamics Method," 2011.
- [122] R. J. Koopmans, "Magnetic Bubble Mixer Forming Plate Assembly". Patente US 2010/0278005 A1, 2010.

- [123] M. R. Powell, "Retrieval Process Development and Enhancements FY96 Pulsed-Air Mixer Testing and Deployment Study," 1996.
- [124] M. Powell, *Retrieval Process Development and Enhancements Pulsed Air Mixing DOE Site Assessment*, 1997.
- [125] R. J. Koopmans, "MIXER AND PROCESS CONTROLLER FOR USE IN WASTEWATER TREATMENT PROCESSES". Patente US 7,282,141 B2, 2007.
- [126] "Pulsair Systems Announces Partnership with USA Diving," 2013. [Online]. Available: <http://www.sportsdestinations.com/management/marketing-sponsorships/pulsair-systems-announces-partnership-usa-diving-6268>. [Acesso em 10 Março 2017].
- [127] L. Daniel, "Mixing Tanks With Air," 2012. [Online]. Available: <https://www.winesandvines.com/template.cfm?section=features&content=97804>. [Acesso em 10 Março 2017].
- [128] Z. T. Hicks, "PARTIAL BUDGETING ANALYSIS OF CONVENTIONAL PUMP OVER VERSUS PULSAIR CAP MANAGEMENT SYSTEM FOR A LARGE-SCALE CALIFORNIA," 2011.
- [129] Air Liquid Mixing Solutions, "Liquid mixing solutions from By Air Liquid Mixing Solutions," 2008. [Online]. Available: <http://www.ferret.com.au/c/by-air-liquid-mixing-solutions/liquid-mixing-solutions-from-by-air-liquid-mixing-solutions-n737720>. [Acesso em 10 Março 2017].
- [130] "Lagrangian Particles," [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/resources/cfd-101/general-cfd/lagrangian-particles/>. [Acesso em 13 Março 2017].
- [131] R. Crahmaliuc, "What Everybody Ought to Know About CFD," [Online]. Available: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/what-everybody-ought-to-know-about-cfd/>. [Acesso em 13 Março 2017].
- [132] J. L. HESS, "CALCULATION OF POTENTIAL FLOW ABOUT ARBITRARY BODIES," 1967.
- [133] D. SPALDING, "A GENERAL PURPOSE COMPUTER PROGRAM FOR MULTI-DIMENSIONAL ONE- AND TWO-PHASE FLOW," 1981.
- [134] E. E. Khalil, "CFD History and Applications," 2012.
- [135] M. M. A. Bhutta, "CFD applications in various heat exchangers design: A review," 2011.
- [136] A. Bakker, "Lecture 13 - Heat Transfer," 2006.
- [137] B. Yan, "CFD SIMULATION OF THE REACTING FLOW PROCESS OF COAL PYROLYSIS TO ACETYLENE IN HYDROGEN PLASMA DOWNER REACTORS," 2010.
- [138] N. Iqba, "Numerical simulation of dense fluid-particle flows using computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM)," 2012.
- [139] K. Becker, "RECENT PROGRESS IN A HYBRID-GRID CFD SOLVER FOR TURBOMACHINERY FLOWS," 2010.
- [140] H. Ding, "Demonstration and Validation of a 3D CFD Simulation Tool Predicting Pump Performance and Cavitation for Industrial Applications," 2010.

- [141] D. Eldin, "Simulation of flow in a pulsed-jet mixer using a volume of fluid model," 2004.
- [142] J. Hua, "Numerical Simulation of Gas Bubbles Rising in Viscous Liquids at High Reynolds Number," 2007.
- [143] L. J. Habeeb, "Experimental Study and CFD Simulation of Two-Phase Flow around Multi-Shape Obstacles in Enlarging Channel," 2013.
- [144] G. Eggenspieler, "Multiphase Models in ANSYS CFD," 2012.
- [145] ANSYS, Inc, *Tutorial 20. Using the Mixture and Eulerian Multiphase*, 2009.
- [146] C. Wollblad, *CFD in COMSOL Multiphysics*, 2011.
- [147] E. STENMARK, "On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software," 2013.
- [148] K. Ekambara, "CFD Modeling of Gas-Liquid Bubbly Flow in Horizontal Pipes: Influence of Bubble Coalescence and Breakup," 2012.
- [149] B. Wu, "CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters," 2010.
- [150] S. Latha, "CFD MULTIPHASE MODELLING FOR EVALUATION OF GAS MIXING IN AN ANAEROBIC DIGESTER," 2009.
- [151] P. Prajapati, "CFD Investigation of the Mixing of Yield-Pseudoplastic Fluids with Anchor Impellers," 2009.
- [152] L. Pakzad, "CHARACTERISATION OF THE MIXING OF NON-NEWTONIAN FLUIDS WITH A Scaba 6SRGT IMPELLER THROUGH ERT AND CFD," 2012.
- [153] ANSYS, Inc., *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009.

6. ANEXOS